

Feinstaub in der Schweiz 2013

Statusbericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL

Impressum

Herausgeber

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL ist eine vom Bundesrat eingesetzte ausser-parlamentarische Fachkommission mit Experten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung. Sie berät das Departement für Umwelt Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in wissenschaftlichen und methodischen Fragen der Luftreinhaltung und bei der Beurteilung, welche Auswirkungen die Luftverschmutzung auf die Gesundheit der Menschen und die Natur hat. Funktionell ist die EKL eine selbstständige und interdisziplinäre Verwaltungskommission, welche zur Behandlung von einzelnen Fragen auch weitere, der Kommission nicht angehörende Fachleute aus verschiedenen Bereichen zur Beratung beiziehen kann.

Autor

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)

Zitierung

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) 2013: Feinstaub in der Schweiz 2013. Bern. 63 S.

Sekretariat EKL

Brigitte Gälli Purghart, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Gestaltung

Karin Nöthiger, 5443 Niederrohrdorf

Titelfotos

Basel 2013 © N. Künzli

Download PDF

www.ekl.admin.ch/de/dokumentation/publikationen/index.html

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache erhältlich. In italienischer Sprache ist sie ebenfalls erhältlich, allerdings ohne den Anhang.

© EKL 2013

Inhalt

Abstracts	4
Vorwort	6
Zusammenfassung	7
1 Einleitung	9
2 Fragestellungen des Berichtes	11
3 Antworten auf die Fragen und Forderungen	12
4 Ausblick	17
Anhang	18
A1 Wie entsteht Feinstaub	18
A2 Gesundheitliche Auswirkungen	26
A3 Immissionen und Messverfahren	33
A4 Ansprüche an einen IGW für Luftschadstoffe	53
A5 Chronologie der Schwebestaub-IGW und der EKL-Empfehlungen zu Schwebestaub, Feinstaub und Russ	54
A6 Abkürzungsverzeichnis	56
A7 Dokumentation	60

Abstracts

Seven years after its previous comprehensive evaluation, the Federal Commission for Air Hygiene has once again carried out an in-depth analysis and evaluation of the new findings regarding the effects of ambient particulate matter on the health of the population. Its recommendations are as follows: 1) to retain the short and long term ambient air quality standards specified for PM₁₀ in the Ordinance on Air Pollution Control (OAPC); 2) to harmonise the particulate matter ambient air quality standards with the globally applicable impact-related air quality guidelines of the World Health Organisation (WHO) and to add a new annual mean ambient air quality standard for PM_{2.5} to Appendix 7 of the OAPC; 3) to specify a binding 10-year interim target for the reduction of carcinogenic soot to 20 percent of the present-day level. This means that additional measures need to be taken to reduce emissions of pollutants contributing to ambient particulate matter, especially from diesel engines and wood-fired stoves. Other indicators of ambient particulate matter (e.g. number of particles, concentration of toxic substances) should be permanently monitored at selected locations, and efforts to define internationally recognised reference measurement procedures need to be resolutely pursued.

Keywords:

Ordinance on Air Pollution Control (OAPC), ambient air quality standards, particulate matter, PM₁₀, PM_{2.5}, soot, elemental carbon (EC), black carbon (BC), organic carbon (OC), organic material (OM), ultrafine particles, number of particles, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), heavy metals, air pollution, health, climate, diesel engines, wood-fired stoves

Sieben Jahre nach der letzten umfassenden Beurteilung hat die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Auswirkungen der Feinstaubbelastung auf die Gesundheit der Bevölkerung erneut eingehend analysiert und bewertet. Sie empfiehlt, 1) die kurz- und langfristigen Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) für PM₁₀ zu belassen; 2) die Feinstaubgrenzwerte mit den wirkungsorientierten, weltweit anwendbaren Richtwerten der WHO in Einklang zu bringen und neu durch einen Jahresmittelwert für PM_{2.5} in Anhang 7 der LRV zu ergänzen, 3) ein verbindliches 10-Jahres-Zwischenziel für die Reduktion von krebserregendem Russ auf 20% der heutigen Werte zu setzen. Somit sind zusätzliche Massnahmen zur Verminderung der für die Feinstaubbelastung relevanten Emissionen zu treffen, insbesondere bei Dieselmotoren und Holzfeuerungen. Weitere Messgrössen der Feinstaubbelastung (wie z. B. Partikelanzahl, toxische Inhaltsstoffe) sollen an ausgewählten Standorten dauerhaft erfasst und die Definition international anerkannter Referenzmessverfahren vorangetrieben werden.

Stichwörter:

Luftreinhalte-Verordnung LRV, Immissionsgrenzwerte, Feinstaub, PM₁₀, PM_{2.5}, Russ, EC, BC, OC, OM, ultrafeine Partikel, Partikelanzahl, PAK, Schwermetalle, Luftbelastung, Gesundheit, Klima, Dieselmotoren, Holzfeuerungen

Sept ans après son dernier examen approfondi de la question, la CFHA a une nouvelle fois analysé et évalué les conséquences de l'exposition aux poussières fines pour la santé humaine. Elle fait les trois recommandations suivantes: 1) maintenir les valeurs limites d'immission à court et à long terme pour les PM₁₀ définies dans l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair); 2) aligner nos valeurs limites pour les poussières fines sur les recommandations de l'OMS, fondées sur les effets et applicables dans le monde entier, en inscrivant notamment dans l'annexe 7 de l'OPair une valeur moyenne annuelle pour les PM_{2.5}; 3) définir un objectif intermédiaire contraignant visant à ramener d'ici 10 ans les concentrations de suies cancérigènes à 20% des valeurs actuelles. Il importe de limiter davantage les émissions responsables de la charge en poussières fines, notamment pour les moteurs diesel et pour les chauffages à bois. Enfin, il faudra suivre l'évolution d'autres indicateurs (nombre de particules, composants toxiques, p. ex.) à divers emplacements clés et progresser dans la définition de méthodes de mesure internationalement reconnues.

Mots-clés:

Ordonnance sur la protection de l'air (OPair), valeurs limites d'immission, poussières fines, PM₁₀, PM_{2.5}, suie, EC, BC, OC, OM, particules ultrafines, nombre de particules, HAP, métaux lourds, pollution atmosphérique, santé, climat, moteurs diesel, chauffage à bois

Sette anni dopo l'ultima valutazione globale, la Commissione federale d'igiene dell'aria ha nuovamente analizzato e valutato in dettaglio le nuove conoscenze scientifiche sugli effetti dell'inquinamento da polveri fini sulla salute della popolazione. La commissione raccomanda di: 1) mantenere per il PM10 i valori limite d'immissione a breve e a lungo termine sanciti dall'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA); 2) armonizzare i valori limite per le polveri fini con i valori indicativi orientati agli effetti dell'OMS, applicabili su scala mondiale, e completarli con un valore annuo medio per il PM2,5 nell'allegato 7 OIA; 3) fissare un obiettivo intermedio vincolante a 10 anni per la riduzione della fuliggine cancerogena al 20 per cento dei valori attuali. Occorre quindi adottare misure supplementari per ridurre le emissioni rilevanti per l'inquinamento da polveri fini, in particolare quelle dei motori diesel e degli impianti di combustione a legna. È inoltre necessario rilevare a lungo termine, in siti selezionati, altre grandezze che misurano l'inquinamento da polveri fini (p. es. il numero di particelle, i composti tossici) e portare avanti la definizione di metodi di misurazione di riferimento riconosciuti a livello internazionale.

Parole chiave:

Ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA), valori limite d'immissione, polveri fini, PM10, PM2,5, fuliggine, EC, BC, OC, OM, particelle ultrafini, numero di particelle, IPA, metalli pesanti, inquinamento atmosferico, salute, clima, motori diesel, impianti di combustione a legna

Vorwort

Sieben Jahre nach der letzten umfassenden Beurteilung gibt die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) im Bericht «Feinstaub in der Schweiz 2013» aufgrund der neuesten Erkenntnisse Empfehlungen zu Feinstaub-Immissionsgrenzwerten (Anhang 7 LRV) und weiteren notwendigen Schritten zur Reduktion der Feinstaub-Belastung ab. Die Empfehlungen richten sich an den Bundesrat und orientieren sich – wie im Umweltschutzgesetz verlangt – am aktuellen Stand der Wissenschaft und der Erfahrung bezüglich der Wirkungen von Feinstaub. Die Gesundheit der Bevölkerung ist ein zentrales Anliegen des Umweltschutzgesetzes. Umfassende nationale und internationale Forschungsprojekte belegen klar den erheblichen gesundheitlichen Schaden, der durch die Luftverschmutzung verursacht wird. Besonders wichtig sind in diesem Zusammenhang die Erkenntnisse aus Schweizer Forschungsprojekten, welche neben den schädlichen Auswirkungen der Feinstaubbelastung auch den gesundheitlichen Gewinn einer verbesserten Luftqualität in eindrücklicher Weise belegen. Vor diesem Hintergrund stehen die neusten Empfehlungen der EKL. Sie bedeuten keinen Strategiewechsel sondern bestätigen die Richtigkeit der bisherigen Luftreinhaltepolitik der Schweiz. Die identifizierten Lücken im Bereich der Feinstaubregulierung sollen aber geschlossen werden. Eine wichtige Grundlage bilden dabei die wirkungsorientierten, weltweit anwendbaren Feinstaub-Richtlinien der WHO.

Die vorgeschlagene Einführung eines Immissionsgrenzwertes für das Jahresmittel von Feinstaub PM_{2.5} steht im Einklang mit den entsprechenden Richtlinien der WHO, welche auf den weltweiten wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen und in vielen Ländern in die nationale Luftreinhaltepolitik einfließen. Die Schweiz hat die Luftqualität bezüglich Feinstaub bisher ausschliesslich durch den Summenparameter PM₁₀ reguliert und die gesundheitlich ebenfalls bedeutende feinere Fraktion nicht separat geregelt. Die EKL anerkennt die Erfolge, welche die Schweiz dank fortschrittlicher Emissionsbegrenzungen bei der Bekämpfung von Dieselmotoren erzielt hat. Sie nimmt jedoch mit Beunruhigung zur Kenntnis, dass für die Reduktion der Emissionen ultrafeiner Partikel (Nanopartikel), zu denen auch der krebserregende Russ gehört, die technisch möglichen Optionen keineswegs vollumfänglich genutzt und umgesetzt werden. Deshalb ist selbst in ländlichen Regionen die Russkonzentration noch immer deutlich zu hoch.

Wir schlagen deshalb vor, die Empfehlungen der EKL in die LRV zu übernehmen und so eine bestehende Lücke zu schliessen, mit dem Ziel, zu einer beschleunigten Abnahme gesundheitsschädigender und krebserregender Schadstoffe beizutragen und den Schutz der Bevölkerung weiter zu verbessern. Im Licht der kürzlich erfolgten Einstufung von Feinstaub als Kanzerogen der Klasse 1 – d. h. als erwiesenermassen krebserregend – ist es ein Gebot der Stunde, die Emissionen und Immissionen weiter zu reduzieren. Die Neuerungen ermöglichen der Schweiz auch weiterhin ihre international viel beachtete und führende Rolle in der Luftreinhaltepolitik wahrzunehmen.

Ich möchte allen Mitgliedern der EKL und den weiteren beteiligten Expertinnen und Experten für die umfassende, wertvolle Arbeit danken. Die EKL hat diesen Bericht im Dezember 2013 einstimmig verabschiedet.

Nino Künzli

Präsident der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL)

Zusammenfassung

Zum Schutz von Mensch und Umwelt setzt der Bundesrat in der Luftreinhalteverordnung LRV Immissionsgrenzwerte für wichtige Luftschadstoffe fest. Gemäss Umweltschutzgesetz müssen die Immissionsgrenzwerte so festgelegt werden, dass nach dem Stand der Wissenschaft und Erfahrung bei Immissionen unterhalb dieser Werte Gesundheit und Umwelt nicht gefährdet sind. Sieben Jahre nach der letzten umfassenden Bewertung hat die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL als beratendes Organ des UVEK erneut geprüft, ob die heute geltenden Immissionsgrenzwerte für Feinstaub noch den Kriterien des Umweltschutzgesetzes entsprechen. Eine grundlegende Änderung der bisherigen Strategie zur Reduktion der Luftschadstoffbelastung ist nicht notwendig, aber die EKL sieht klaren Handlungsbedarf bei den Immissionsgrenzwerten und für zusätzliche Massnahmen zum Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor den Auswirkungen von Feinstaub. Aufgrund des aktuellen Standes des Wissens empfiehlt sie dem Bundesrat, die Immissionsgrenzwerte für Feinstaub in der LRV anzupassen (siehe Tab. 1) um den neuen Erkenntnissen schweizerischer und internationaler Studien über die Wirkung von Feinstaub auf die Gesundheit Rechnung zu tragen. Drei Forderungen stehen im Zentrum:

1. Die PM₁₀ Langzeit- und Kurzzeitgrenzwerte sollen bestehen bleiben, wobei die Anzahl tolerierter Überschreitungen von einer auf drei erhöht werden soll. Diese Anpassung entspricht den Empfehlungen der WHO und bringt für die Schweiz die im Vollzug wünschbare Kohärenz bei der Einhaltung von Langzeit- und Kurzzeitimmissionsgrenzwerten.
2. Neu soll auch in der Schweiz ein Immissionsgrenzwert für den feinen Schwebestaub (PM_{2.5}) eingeführt werden, unter Übernahme der wissenschaftlich gestützten Empfehlungen der WHO (Jahresmittelwert von 10 µg/m³).
3. Die Belastung durch krebserregenden Russ soll innerhalb der kommenden 10 Jahre auf einen Fünftel (20 %) der heutigen Belastung gesenkt werden. Die Konzentration dieser krebserregenden Schadstoffe muss aus Sicht des Gesundheitsschutzes so tief wie möglich gehalten werden.

Die EKL sieht aufgrund der heutigen Sachlage und des aktuellen Standes der Wissenschaft und Messtechnologie davon ab, einen zusätzlichen Immissionsgrenzwert für bestimmte Inhaltsstoffe oder die Anzahl Partikel vorzuschlagen. Die EKL fordert hingegen, dass die quellen nahen hohen Belastungen durch die gesundheitsgefährdenden ultrafeinen Partikel und krebserregenden Russ durch geeignete Massnahmen deutlich vermindert werden. Die EKL fordert die Anpassung der Emissionsgrenzwerte in der LRV an den besten Stand der Technik. Die hohen Feinstaubemissionen von Holzfeuerungen müssen vermindert und bei allen Motorentypen (inklusive Benzinmotoren, Traktoren und stationäre Motoren) Partikelfilter eingesetzt oder gleichwertige Massnahmen ergriffen werden. Auch wenn keine Grenzwerte für diese zusätzlichen Partikelparameter festgelegt werden, sollen sie an ausgewählten Stationen des NABEL-Messnetzes dauerhaft gemessen werden, um den Erfolg der emissionsseitigen Massnahmen dokumentieren zu können.

Tab. 1 > LRV mit den vorgeschlagenen Änderungen

in rotem Fettdruck markiert.

Schwebestaub (PM10)	20 µg/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
	50 µg/m ³	24-h-Mittelwert; darf höchstens dreimal pro Jahr überschritten werden
Schwebestaub (PM2.5)	10 µg/m³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Blei (Pb) im Schwebestaub (PM10)	500 ng/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Cadmium (Cd) im Schwebestaub (PM10)	1.5 ng/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)

1 Einleitung

Der Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen ist die zentrale Forderung im Bundesgesetz über den Umweltschutz USG. Dieser Schutzanspruch ist in der Verfassung verankert (Art. 74 BV). Um den Schutzanspruch einzulösen, sieht das USG für die Luftreinhaltung ein zweistufiges Vorgehen vor. Nach Art. 11 Abs. 2 USG sind Emissionen unabhängig von der Umweltbelastung – also in jedem Fall – so weit zu begrenzen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist (erste Stufe des Immissionsschutzes). Das Vorsorgeprinzip gebietet, die Luftverschmutzung so niedrig wie möglich zu halten und nicht erst bei einer konkreten Gefährdung von Mensch und Umwelt einzugreifen. Auch wird keine Sicherheit über die Schädlichkeit oder Lästigkeit von Einwirkungen vorausgesetzt. Vielmehr genügt die Wahrscheinlichkeit von Schädigungen, denn Sicherheitsmargen liegen im Sinne der Vorsorge.

Strengere Massnahmen sind nötig, wenn feststeht oder zu erwarten ist, dass die Einwirkungen von Luftschadstoffen unter Berücksichtigung der bestehenden Umweltbelastung schädlich oder lästig werden, die Immissionen also im Vergleich mit dem verfassungsmässigen Ziel übermässig sind. In diesem Fall werden aufgrund von Art. 11 Abs. 3 USG verschärfte Emissionsbegrenzungen erlassen (zweite Stufe des Immissionsschutzes). Bei dieser zweiten Stufe steht der Schutz des Menschen und seiner Umwelt vor einer übermässigen Belastung über den wirtschaftlichen Überlegungen. Auch auf dieser Stufe ist aber das Prinzip der Verhältnismässigkeit zu wahren.

Ob nur vorsorgliche oder auch verschärfte Emissionsbegrenzungen anzuordnen sind, hängt davon ab, ob die Luftbelastung übermässig ist oder nicht. Für die Beurteilung der Übermässigkeit – der Schädlichkeit oder Lästigkeit – von Einwirkungen sind deshalb verbindliche Massstäbe erforderlich. Das USG verpflichtet den Bundesrat, zur Beurteilung der schädlichen und lästigen Einwirkungen durch Luftverunreinigungen für ausgewählte Schadstoffe, die als Indikatoren für die Luftbelastung gelten, Immissionsgrenzwerte (IGW) festzulegen. Dabei sind insbesondere auch die Wirkungen der Immissionen auf Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit, wie Kinder, Kranke, Betagte und Schwangere zu berücksichtigen (Art. 13 USG). Ebenfalls zu berücksichtigen sind Kombinationswirkungen bei gleichzeitigem Einwirken mehrerer Schadstoffe, d.h. die Einwirkungen müssen sowohl einzeln als auch gesamthaft und nach ihrem Zusammenwirken beurteilt werden (Art. 8 USG). Die geltenden IGW für ein Dutzend Luftschadstoffe finden sich in Anhang 7 der Luftreinhalte-Verordnung LRV.

Nach dem Inkrafttreten des USG am 1. Januar 1985 und der LRV am 1. März 1986 setzte der Bundesrat im Juli 1986 die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) als ständiges Beratungsgremium ein. Sie erhielt den Auftrag, das zuständige Departement bzw. Amt in wissenschaftlich-methodischen Fragen der Luftreinhaltung zu beraten. In der Folge fokussierte die EKL ihre Tätigkeit auf die Erarbeitung und Überprüfung der Grundlagen für die Festlegung der Immissionsgrenzwerte gemäss dem Stand der Wissenschaft und der Erfahrung im Sinne von Art. 13 und 14 USG.

Immissionsgrenzwerte müssen in regelmässigen Abständen neu beurteilt werden. Neue, durch bestehende Grenzwerte noch nicht oder nur ungenügend abgedeckte Wirkungen und Risiken müssen aufgrund kontinuierlicher Beobachtung der Entwicklungen identifiziert und geprüft werden. Sind die Wirkungen und Risiken durch wissenschaftliche Untersuchungen genügend gesichert, können sie durch die Festlegung neuer oder geeignet angepasster Grenzwerte besser beurteilt und anschliessend mit gezielten Massnahmen reduziert werden. Die EKL hat im Bericht «25 Jahre Luftrein-

haltung auf der Basis des Umweltschutzgesetzes – Thesen und Empfehlungen» (EKL 2010) u.a. empfohlen, auch künftig wirkungsorientierte, dem Stand der Wissenschaft entsprechende und vollzugstaugliche Immissionsgrenzwerte zu erlassen, d. h. die IGW der LRV sollen auch in Zukunft auf den Schutz des Menschen und der Umwelt ausgerichtet sein. In ihrem früheren Bericht «Feinstaub in der Schweiz» hat die EKL 2007 noch auf Empfehlungen für einen zusätzlichen Immissionsgrenzwert für PM_{2.5} verzichtet. Sie hat jedoch bereits damals darauf hingewiesen, dass die Situation im Licht neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse in einigen Jahren neu beurteilt werden müsse. Im Rahmen des Projekts «Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution – REVIHAAP», welches durch die EU mitfinanziert wurde, hat eine Gruppe von ca. 30 Experten Antworten auf 24 Fragen zu Luftschadstoffen und Gesundheit sowie zur künftigen Luftreinhalte-Politik in Europa diskutiert und formuliert. Dabei wurden die neusten Erkenntnisse auf dem Gebiet Luftverschmutzung und Gesundheit zusammengetragen und evaluiert (WHO 2013). Da auch Experten der EKL in das Projekt REVIHAAP involviert waren, konnten die neusten Erkenntnisse zu Feinstaub und Gesundheit direkt in den vorliegenden Bericht der Kommission einfließen.

Der REVIHAAP-Bericht betont insbesondere, dass die bestehenden Empfehlungen der WHO auch durch neuere Erkenntnisse vollumfänglich gestützt und auf eine noch solidere Basis gestellt werden. Die Einhaltung dieser Empfehlungen ist für den Gesundheitsschutz von zentraler Bedeutung. Die Richtwerte der WHO beinhalten keine Sicherheitsmarge, selbst bei tiefen Konzentrationen werden noch Wirkungen auf die Gesundheit beobachtet. Der Bericht stellt fest, dass die EU-Grenzwerte im Moment beträchtlich von den Luftqualitätsrichtlinien der WHO abweichen. Die Experten empfehlen der EU, insbesondere die künftig zu erreichenden PM_{2.5}-Grenzwerte zu überprüfen und zu senken. Neu erkannte Risiken wie z. B. Russ (Health Effects of Black Carbon, WHO 2012; Definition von Russ siehe Kasten) und die sehr hohe Anzahl ultrafeiner Partikel aus Verbrennungsprozessen müssen ebenfalls aufmerksam verfolgt und die Immissionsgrenzwerte nach Vorliegen von ausreichender wissenschaftlicher Evidenz ergänzt oder angepasst werden.

Aufgrund der kürzlich erfolgten Einstufung von Feinstaub als Kanzerogen der Klasse 1 (eindeutig krebserzeugend beim Menschen) durch die IARC ist es ein Gebot der Stunde, die Emissionen und Immissionen deutlich zu reduzieren.

Was ist Russ?

Es existiert keine einheitliche, eindeutige Definition von Russ (Petzold 2013). Russ umfasst alle primären, kohlenstoffhaltigen Partikel eines unvollständigen Verbrennungsprozesses. Er besteht v. a. aus elementarem (schwarzem) Kohlenstoff (elemental carbon – EC) und organischen Verbindungen, die als organischer Kohlenstoff (organic carbon – OC) gemessen werden. Immissionsseitig wird oft der elementare Kohlenstoff allein als Russ bezeichnet (z. B. in der deutschen 23. BImSchV). Black Carbon (BC) ist eine operationell definierte Bezeichnung von kohlenstoffhaltigen Partikeln, welche mit Hilfe von optischen Messmethoden (Lichtabsorption und/oder Streuung) gemessen werden. Früher war ein einfaches Messverfahren zur Messung von «black smoke» (BS) gebräuchlich, bei dem Luft durch ein Filter gesaugt und die optische Reflexion gemessen wird. EC und OC werden mit Hilfe von chemischen oder thermo-optischen Methoden bestimmt. OC besteht aus einer riesigen Vielfalt von chemischen Verbindungen. Es sind bei weitem nicht alle identifiziert. Bekannte Verbindungen im OC sind beispielsweise Levoglucosan, ein Inhaltsstoff von Holzrauch, organische Ein- oder Mehrfachsäuren, langkettige Alkane, organische Oligomere und polyzyklische aromatische Verbindungen (PAH).

2 Fragestellungen des Berichtes

Heute sind in der Luftreinhalte-Verordnung folgende Immissionsgrenzwerte für lungengängigen Feinstaub festgelegt.

Schwebestaub (PM10)	20 µg/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
	50 µg/m ³	24-h-Mittelwert; darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden
Blei (Pb) im Schwebestaub (PM10)	500 ng/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Cadmium (Cd) im Schwebestaub (PM10)	1.5 ng/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)

Ausgehend von der in der Einleitung beschriebenen Situation möchte die EKL mit diesem Bericht die folgenden vier Fragen beantworten:

1. Die PM10-Konzentration wird zurzeit mit einem Kurzzeit-Immissionsgrenzwert für das Tagesmittel (24 h) und einem Langzeit-Immissionsgrenzwert für das Jahresmittel reguliert. Ist dies auch weiterhin angemessen?
2. Falls ein Kurzzeit-Immissionsgrenzwert für PM10 beibehalten werden soll: Müssen die heute gültige Konzentration (50 µg/m³) und die Toleranz (1 Überschreitung des Tagesmittelgrenzwertes pro Jahr) angepasst werden?
3. Falls ein Langzeit-Immissionsgrenzwert für PM10 beibehalten werden soll: Muss der heute gültige Immissionsgrenzwert von 20 µg/m³ (als Jahresmittelwert) angepasst werden? Sollte er durch einen Langzeit-Immissionsgrenzwert für PM2.5 ergänzt werden oder ist es weiterhin angemessen, PM2.5 nicht separat zu regulieren?
4. Müssen bisher nicht regulierte Feinstaubparameter, insbesondere im Grössenbereich unter einem Mikrometer (1 µm), neu durch Immissionsgrenzwerte in der LRV geregelt werden, um vor allem auch die strassennahe verkehrsbedingte Luftverschmutzung und die Luftverschmutzung wegen Holzfeuerungen zu reduzieren?

Im folgenden Kapitel werden diese Fragen beantwortet und Schlussfolgerungen gezogen, unter kurzer Zusammenfassung der Begründungen. Im Anhang werden die wichtigsten Hintergrundinformationen und der Stand des Wissens, der für die Beantwortung der Fragen entscheidend war, ausführlicher dargestellt. Weitergehende Informationen zum Thema finden sich auch in den Literaturangaben (siehe Anhang A7). Anhang A1 fasst insbesondere die Entstehung des Feinstaubes zusammen, da diese bei der Festlegung von Regulierungen in Betracht gezogen werden muss. Anhang A2 schildert die Zusammenhänge von Gesundheitsschäden mit den verschiedenen Feinstaubmessgrössen. Anhang A3 erläutert die zeitlichen und räumlichen Beziehungen zwischen den Immissionen von PM und anderen Beurteilungsgrössen des Feinstaubes, den Stand der Messtechnologie und den Zusammenhang zwischen diesen Schadstoffen und der Klimaveränderung. Anhang A4 gibt eine Übersicht über wichtige Kriterien, welche ein Kandidat für einen zusätzlichen Immissionsgrenzwert erfüllen sollte, und bewertet mögliche Indikatoren diesbezüglich.

3 Antworten auf die Fragen und Forderungen

Die PM10-Konzentration wird zurzeit mit einem Kurzzeit-Immissionsgrenzwert für das Tagesmittel (24 h) und einem Langzeit-Immissionsgrenzwert für das Jahresmittel reguliert. Ist dies auch weiterhin angemessen?

Die Regulierung der Feinstaubbelastung mittels Tagesmittelwerten steht im Bezug zu den akuten gesundheitlichen Auswirkungen von kurzen Belastungsepisoden. Die Jahresmittelwerte sind für Langzeitwirkungen der Schadstoffe relevant. Aus gesundheitlicher Sicht ist es wichtig, beiden Wirkungsbereichen gerecht zu werden, weshalb unabhängige Immissionsgrenzwerte notwendig sind. Insbesondere müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden: Die Kurzzeitwirkungen tragen auch zu langfristigen Gesundheitsproblemen bei. Die Langzeitwirkung wird aber nicht durch die Summe der kurzzeitigen Einwirkungen abgebildet. Es sind nicht unbedingt dieselben Personen von den kurzfristigen Belastungen betroffen, welche an den Langzeitfolgen leiden. Nicht alle biologischen Wirkungsmechanismen, welche für akute Folgen relevant sind, sind auch für die Langzeitfolgen von Bedeutung; die umgekehrte Aussage trifft ebenfalls zu. Trotz Einhaltung der Jahresmittelwerte kann es Perioden mit zu hohen kurzfristigen Belastungen geben.

Antwort auf Frage 1

Aus diesen Gründen soll PM10 weiterhin anhand von beiden Immissionsgrenzwerten, einem Kurzzeit- und einem Langzeit-Immissionsgrenzwert, beurteilt werden.

Falls ein Kurzzeit-Immissionsgrenzwert für PM10 beibehalten werden soll: Müssen die heute gültige Konzentration ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und die Toleranz (1 Überschreitung des Tagesmittelgrenzwertes pro Jahr) angepasst werden?

Der derzeit gültige Kurzzeit-Immissionsgrenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (als 24-h-Mittelwert) soll beibehalten werden. Die Anzahl tolerierter Überschreitungen soll an die Empfehlung der WHO angepasst, das heisst, von 1 auf 3 pro Jahr (entspricht einem 99-Perzentil) erhöht werden. Diese Angleichung bringt für die Schweiz bei der Einhaltung von Langzeit- und Kurzzeitimmissionsgrenzwerten sehr gute Kohärenz, was für den Vollzug von Vorteil ist. Aus gesundheitlicher und lufthygienischer Sicht ist diese Anpassung unproblematisch. Eine Übernahme der derzeitigen EU-Regelung (35 Überschreitungen pro Jahr) wird aus gesundheitlichen Gründen jedoch ganz klar abgelehnt. Sie würde den Vorgaben der schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung widersprechen. Im Gegensatz zur Schweiz hat die EU für Feinstaub keine wirkungsorientierten Werte, sondern innerhalb eines bestimmten Zeitraums zu erreichende, rechtlich einklagbare Grenzwerte gesetzt. Sie werden durch ein komplexes System von Zielwerten, Verpflichtungen und Zielen zur Expositionsreduktion ergänzt.

Antwort auf Frage 2

Der derzeit gültige Kurzzeit-Immissionsgrenzwert für PM10 soll bei $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (als 24-h-Mittelwert) belassen werden, wobei neu 3 Überschreitungen pro Jahr zulässig sein sollen.

Falls ein Langzeit-Immissionsgrenzwert für PM10 beibehalten werden soll: Muss der heute gültige Immissionsgrenzwert von 20 µg/m³ (als Jahresmittelwert) angepasst werden? Sollte er durch einen Langzeit-Immissionsgrenzwert für PM2.5 ergänzt werden oder ist es weiterhin angemessen, PM2.5 nicht separat zu regulieren?

Die gesundheitlichen Folgen von langfristig erhöhten Feinstaubbelastungen und die damit verbundenen Kosten sind noch bedeutender als die Folgen kurzzeitig hoher Werte. Die krankmachenden Wirkungen beginnen ohne klar erkennbare Schwelle bereits bei tiefen Konzentrationen. Daher sollte eine Minimierung der Belastung aller Feinstaubfraktionen in jedem Fall Ziel der politischen Bemühungen sein.

Antwort auf Frage 3

Atembarer Feinstaub PM10 kann in eine feine Fraktion (Teilchen kleiner als 2.5 µm; PM2.5) und eine gröbere Fraktion (Teilchen zwischen 2.5 µm und 10 µm) unterteilt werden. Alle drei Feinstaubgrößen, PM2.5, die gröbere Fraktion von PM10 und PM10 selbst, sind mit Wirkungen auf die Gesundheit verbunden. Die Wirkungsmechanismen und Auswirkungen der feinen und gröberen Fraktion von PM10 sind teilweise verschieden. Aus Sicht des Gesundheitsschutzes sollten die Konzentrationen sowohl der feineren als auch der gröberen Feinstaubfraktion möglichst tief gehalten werden.

In der Schweiz sind PM2.5 und PM10 stark korreliert. Die Abnahme der Massenkonzentrationen von PM2.5 und PM10 während der letzten Jahre verlief an fast allen Standorten der Schweiz parallel. Somit waren die Schweizer Luftreinhaltemassnahmen insgesamt von ähnlicher Bedeutung und Wirkung für PM2.5 und PM10. Im Durchschnitt macht PM2.5 etwa 75 % des PM10 aus. Die Einhaltung des heutigen Langzeit-Immissionsgrenzwertes für PM10 von 20 µg/m³ entspricht somit im Durchschnitt der Einhaltung eines Jahresmittelwertes von ca. 15 µg/m³ PM2.5. Die Forschung belegt klar, dass gesundheitliche Wirkungen von PM2.5 auch unterhalb dieser Konzentrationen nachgewiesen werden können. Aus Sicht des Gesundheitsschutzes genügt die Einhaltung eines Jahresmittelwertes von 15 µg/m³ PM2.5 nicht. In der Tat sind beispielsweise die USA 2012 dem Entscheid Kaliforniens gefolgt und haben den PM2.5-Immissionsgrenzwert von vormals 15 µg/m³ auf 12 µg/m³ gesenkt. Die WHO empfiehlt einen maximalen Jahresmittelwert von 10 µg/m³ PM2.5.

Die EKL sieht Handlungsbedarf um die PM2.5-Belastung der Bevölkerung auf die von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) geforderten Werte zu reduzieren. Die WHO-Empfehlungen beziehen die neusten Resultate der schweizerischen und internationalen Gesundheitsforschung mit ein. Gemäss Umweltschutzgesetz müssen die Immissionsgrenzwerte dem Stand der Wissenschaft entsprechen. Auch wenn in der Schweiz der Jahresmittelwert von 20 µg/m³ PM10 eingehalten wird, liegen die PM2.5-Belastungen trotzdem noch bis zu 50 % über dem WHO-Richtwert.

In Angleichung an die Strategien vieler Länder und der EU sollen die Immissionsgrenzwerte für PM10 zusätzlich durch einen Langzeit-Immissionsgrenzwert für PM2.5 ergänzt werden. Um den gesetzlich geforderten Gesundheitsschutz auch für die feine Fraktion des Feinstaubes zu gewährleisten, soll der von der WHO empfohlene Jahresmittelwert von 10 µg/m³ PM2.5 als Immissionsgrenzwert in der Luftreinhalte-Verordnung verankert werden.

Vorschlag der EKL

Der vorgeschlagene IGW von 10 µg/m³ PM2.5 stellt eine wissenschaftlich gestützte Forderung dar, welche sich gemäss schweizerischen gesetzlichen Vorgaben am Gesundheitsschutz orientiert. Er kann nicht mit den Grenzwerten der EU verglichen werden, welche auf andern Überlegungen basieren und ab einem festgelegten Zeitpunkt nicht mehr überschritten werden dürfen. Die Experten der WHO empfehlen der

EU im REVIHAAP-Bericht dringend, die in Zukunft zu erreichenden PM_{2.5}-Grenzwerte zu überprüfen und zu senken.

Um den von der EKL vorgeschlagenen Immissionsgrenzwert für PM_{2.5} zu erreichen, sind Vorschriften nach dem besten Stand der Technik bei allen Quellen von Feinstaub und dessen Vorläufergasen nötig. Die neuen Euro-6-Abgasgrenzwerte werden in den kommenden Jahren den Schadstoffausstoss des Strassenverkehrs stark vermindern. Zusätzlich nötig sind strenge Vorschriften für die übrigen Fahrzeuge (wie Traktoren, industrielle Fahrzeuge), stationäre Motoren (wie WKK, Notstromaggregate) und Feuerungen (insbesondere Feststofffeuerungen). Ältere Holzfeuerungen mit hohen Schadstoffemissionen müssen durch moderne Anlagen ersetzt werden, welche dem besten Stand der Technik entsprechen, einen hohen Wirkungsgrad und tiefe Schadstoffemissionen aufweisen. Für zusätzliche Überlegungen zum vorgeschlagenen IGW wird auf Anhang A4 verwiesen.

Müssen bisher nicht regulierte Feinstaubparameter, insbesondere im Grössenbereich unter einem Mikrometer (1 µm), neu durch Immissionsgrenzwerte in der LRV geregelt werden, um vor allem auch die strassennahe verkehrsbedingte Luftverschmutzung und die Luftverschmutzung wegen Holzfeuerungen zu reduzieren?

Im Bereich der immissionsseitig nicht regulierten quellennahen partikulären Schadstoffe besteht aus folgenden Gründen klarer Handlungsbedarf:

Antwort auf Frage 4

1. Die zeitliche und räumliche Verteilung von PM₁₀ und PM_{2.5} bildet die Verteilung der quellennahen Schadstoffe (wie zum Beispiel ultrafeine Partikel, Russ etc.) nicht genügend ab. Sie können somit nicht als Indikatoren der quellennahen partikulären Schadstoffe dienen. Die feinsten Partikel (d.h. insbesondere jene kleiner als 0.5 Mikrometer im Durchmesser) wirken über teilweise andere Mechanismen als die gröberen Partikel. Werden sie eingeatmet, können sie in der Lunge Zellen und Gewebe durchdringen, ins Blut gelangen und dadurch im ganzen Organismus verteilt werden. Was dies für die Gesundheit bedeutet, ist noch nicht völlig geklärt, aber Gegenstand intensiver Forschung. Es muss davon ausgegangen werden, dass die erst ansatzweise untersuchten gesundheitlichen Folgen dieser quellennahen Schadstoffe mindestens teilweise unabhängig sind von denjenigen der grösseren Feinstaubfraktionen über 1 µm Durchmesser. Dieselmotoren, der fast ausschliesslich aus Partikeln unter 1 µm besteht, ist zudem **krebserregend** (durch die WHO-Kommission IARC seit 2012 als Kanzerogen der Klasse 1 eingeteilt). Dieselbe Einteilung gilt seit Oktober 2013 auch für die Feinstaubmischung im Allgemeinen.
2. Dem Vorsorgeprinzip folgend ist die Regulierung und **Minimierung** der kleinsten Fraktion der Partikel angemessen und angebracht.
3. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass lufthygienische Massnahmen die heute nicht regulierten quellennahen Schadstoffe in gleichem Masse beeinflussen werden wie die derzeit regulierten Schadstoffe. Die LRV muss deshalb auch die quellennahen Schadstoffe gezielt umfassen.

Die EKL hat sich intensiv mit der Frage auseinandergesetzt, wie diese quellennahen partikelförmigen Schadstoffe am besten reguliert werden könnten, um den Forderungen des Gesundheitsschutzes nachzukommen. Dank dem Aktionsplan Feinstaub hat die Schweiz die Belastung durch diese Schadstoffe bereits gesenkt, wenn auch noch nicht im nötigen Mass. Die EKL hat insbesondere überprüft, ob ein IGW für einen noch festzulegenden Indikator dieser Schadstoffgruppe – zum Beispiel die Partikelanzahl – erfolversprechend wäre. Die Kriterien, die bei der Festlegung eines IGW zu erfüllen sind, sind im Anhang A4 zusammengefasst. Den im Prinzip angemessenen Forderungen nach einem IGW stehen folgende Gründe entgegen:

- Die immissionsseitigen Messverfahren für ultrafeine Partikel, respektive andere grundsätzlich mögliche Indikatoren der quellennahen Belastungen sind zurzeit noch nicht international standardisiert. Die Einführung eines entsprechenden IGW wäre daher mit grossen Schwierigkeiten bei der Ermittlung und Beurteilung der Belastung sowie im Vollzug verbunden.
- Bei der quellennahen Belastung handelt es sich um ein komplexes Gemisch von Schadstoffen mit unterschiedlichen Charakteristiken. Bei der Wahl von gesundheitlich sinnvollen Indikatoren des Gemischs müssen viele Kriterien beachtet werden. Mehrere Kandidaten werden diskutiert, wie z.B. Russmasse, Partikelanzahl oder -oberfläche, oxidatives Potenzial oder der Metallgehalt. Für die Auswahl eines Messindikators fehlen derzeit aber die wissenschaftlichen Grundlagen.
- Die oft extremen zeitlichen und räumlichen Unterschiede in den Konzentrationen dieser quellennahen Schadstoffe erschweren die Festlegung eines IGW. Langzeitmittelwerte könnten an Standorten mit z.B. stark wechselnden Windbedingungen vorübergehende Spitzenbelastungen verschleiern, während Kurzzeit-Immissionsgrenzwerte im Vollzug je nach gewähltem Zeitfenster zu stark unterschiedlichen Beurteilungen führen würden. So kann ein einzelnes, vorbeifahrendes Fahrzeug je nach Motor, Baujahr und Windverhältnissen die mittlere Konzentration ultrafeiner Partikel lokal kurzfristig um das 10- bis 20-fache erhöhen.
- Auch ohne IGW wurden in der Schweiz als Folge des Minimierungsgebotes in den letzten 20 Jahren grosse Verbesserungen bei den Belastungen mit Russ erreicht. Dies zeigt, dass die Luftreinhaltepolitik auch für Schadstoffe, welche nicht durch Immissionsgrenzwerte reguliert sind, positive Wirkungen hatte.

Aus diesen Gründen verzichtet die EKL zum jetzigen Zeitpunkt auf eine Empfehlung zur Einführung eines separaten IGW für Partikel im Grössenbereich unter einem Mikrometer. Sie fordert, zum Schutz der Gesundheit in der LRV fortschrittliche Emissionsvorschriften für quellen nahe Schadstoffe, insbesondere ultrafeine Partikel (Nanopartikel) festzulegen und den Vollzug zu verstärken. Die EKL schlägt dazu namentlich Folgendes vor:

- a) Die Schweiz soll sich international stark für die Standardisierung der immissionsseitigen Messungen einsetzen sowie für die Ermittlung der zeitlichen und räumlichen Verteilung der quellennahen Schadstoffe und deren Veränderungen. Im Zentrum steht – auch international – als gut messbarer Indikator vor allem der elementare Kohlenstoff (EC). Ebenfalls von Bedeutung sind die Partikelanzahl, organischer Kohlenstoff (OC) sowie die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), insbesondere das Benzo(a)pyren. All diese Schadstoffe sollen weiterhin und dauerhaft an ausgewählten Standorten des NABEL-Netzes gemessen werden. Diese Messungen dienen auch der Erfolgskontrolle der getroffenen Massnahmen.
- b) Für Russ (der vor allem aus EC und OC besteht) gilt zwar bereits heute ein Minimierungsgebot, da es für kanzerogene Schadstoffe keine unschädlichen Schwellenwerte gibt. Die Umsetzung des Minimierungsgebots ist in der Schweiz jedoch ungenügend. Trotz grossen Verbesserungen übersteigen die Belastungen an vielen Orten das nach den Kriterien des Umweltschutzgesetzes als «tolerierbar» eingestufte Krebsrisiko noch immer um ein Mehrfaches. Als Schutzziel ist ein Lebenszeitrisiko von höchstens einem Krebsfall pro Million Einwohner zugrunde zu legen (EKL 2007, EKL 2010). Das bedeutet, dass die EC-Konzentrationen im bevölkerungsgewichteten Mittel $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Jahresmittelwert nicht übersteigen sollten – heute liegen sie bei rund $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An den am stärksten verkehrsbelasteten Stationen dürften die EC-Konzentrationen im Jahresmittel nicht mehr als $0.2\text{--}0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ betragen (Empfehlung EKL, Richtwert) – heute werden Werte von $2\text{--}3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Von der Emissionsseite her betrachtet sollten längerfristig höchstens noch 100–200 Tonnen Russ in die Luft gelangen (EKL 2007). In den Jahren 2010–2012 wurden in der

Schweiz im Durchschnitt noch rund 2000–3000 Tonnen Russ pro Jahr in die Luft emittiert. Folglich müssen die Russemissionen gegenüber dem heutigen Stand längerfristig noch um einen Faktor 10–20 reduziert werden. **Die EKL fordert als Zwischenziel, dass an quellennahen Standorten die Russ- bzw. EC-Konzentration innerhalb der nächsten 10 Jahre auf maximal 20 % der heutigen Werte gesenkt wird.** Dieses Zwischenziel soll insbesondere durch die im Folgenden genannten Massnahmen zur Verminderung der Emissionen erreicht werden.

- Die EKL fordert die zügige und vollständige Einführung von Partikelfiltern oder gleichwertigen Technologien bei allen Dieselmotoren im Onroad- und Offroad-Bereich. Dazu gehören insbesondere auch Landwirtschaftsfahrzeuge, Dieselgeneratoren, Schiffe und Wärmekraftkoppelungsanlagen sowie z. B. Notstromgeneratoren. Ohne Filteranlagen emittieren letztere trotz nur kurzzeitigem Einsatz während der periodisch notwendigen Testläufe sehr grosse Mengen Dieselmotoren. Zudem wird die gesetzliche Gleichbehandlung von Diesel- und Benzinfahrzeugen gefordert, wobei die besten technologisch erreichbaren Standards jeweils für alle Motoren Gültigkeit haben müssen.
- Die EKL fordert die Reduktion der Schadstoffemissionen aus motorisierten Zweiradfahrzeugen, wobei die besten technisch möglichen Standards zum Tragen kommen müssen.
- Die EKL fordert strenge Vorschriften für Holzfeuerungen nach dem besten Stand der Technik bezüglich Schadstoffemissionen und Wirkungsgrad. Anlagen mit schlechtem Wirkungsgrad (z. B. Cheminées) sollen nicht als Heizsysteme eingesetzt werden dürfen. Ältere Feuerungen mit hohen Schadstoffemissionen sollen durch moderne Anlagen ersetzt werden, welche einen hohen Wirkungsgrad und tiefe Schadstoffemissionen aufweisen. Kritische Stoffe (Rinde, Altholz, Stroh und dergleichen) sind nur in dafür zugelassenen, professionell betriebenen Grossanlagen mit wirksamer Feinstaubabscheidung einzusetzen.

4 Ausblick

Die vorgeschlagenen Ergänzungen der LRV und Luftreinhaltepolitik werden ohne Zweifel einen erheblichen Beitrag zum Gesundheitsschutz der Schweizer Bevölkerung leisten. Luftqualitätsmessungen und Forschung sollen dies dokumentieren und belegen. In den kommenden Jahren wird die WHO voraussichtlich eine erneute Beurteilung der wissenschaftlichen Evidenz in Auftrag geben, da die Forschung im Bereich Luftverschmutzung und Gesundheit grosse Fortschritte macht und sich zunehmend auch den spezifischen Wirkungen der Nanopartikel widmet. Die EKL wird diesen Prozess aufmerksam verfolgen um die für die Schweiz relevanten Aspekte zu diskutieren. In 5 Jahren soll die Situation – insbesondere bezüglich Russbelastung – erneut beurteilt werden. Dabei steht die Frage im Zentrum, in welchem Ausmass die Feinstaub- und Russkonzentrationen auch an belasteten Standorten reduziert werden konnten. Es soll sich aufgrund einer Neubeurteilung dann zeigen, ob die hier vorgeschlagenen Ergänzungen der LRV den wirkungsorientierten Gesundheitsschutz angemessen verbessern konnten oder ob sich die Einführung eines Immissionsgrenzwertes für Russ oder für andere Beurteilungsgrössen der Feinstaubbelastung aufdrängen wird. Diese Diskussionen sollen nicht nur in der EKL sondern auch in internationalen Expertengremien mit Schweizer Beteiligung geführt werden.

Anhang

A1 Wie entsteht Feinstaub

A1-1 Einleitung

Informationen über die Quellen von Feinstaub sind nötig, um Prioritäten zu setzen und geeignete Minderungsmassnahmen zu treffen. Feinstaub entsteht durch anthropogene und natürliche Emissionen. Ein Teil des Feinstaubes gelangt direkt als feste oder flüssige Partikel in die Luft, ein wesentlicher Teil wird aber erst in der Atmosphäre durch komplexe Prozesse aus Vorläufergasen gebildet.

Untersuchungen über die Zusammensetzung in der Schweiz zeigen, dass Feinstaub PM10 an mässig belasteten Standorten in Städten und Agglomerationen im Jahresmittel etwa je zu einem Drittel aus kohlenstoffhaltigen Aerosolen (elementarem Kohlenstoff und organischen Verbindungen), sekundären anorganischen Aerosolen (Nitrat, Sulfat, Ammonium) sowie Mineralien, Spurenelementen und Feuchtigkeit besteht (Hüglin 2012).

Die Konzentrationen der Hauptbestandteile von PM10 an nicht direkt verkehrsexponierten Standorten im Schweizer Mittelland sind recht ähnlich. Die leicht erhöhten mittleren PM10-Konzentrationen im städtischen gegenüber dem ländlichen Raum sind hauptsächlich auf höhere Beiträge von elementarem Kohlenstoff (EC) und Spurenelementen zurückzuführen (Hüglin 2012).

Motorfahrzeuge und Holzfeuerungen gehören zu den wichtigsten Quellen für Feinstaub und die darin enthaltenen organischen Kohlenstoffverbindungen und Russ. Gesundheitsrelevante Partikelanteile stammen zur Hauptsache direkt (primär) oder indirekt (sekundär) aus Verbrennungsprozessen, vorab Motorenemissionen und Holzfeuerungen. Verbrennungsquellen tragen durch partikuläre und gasförmige Abgasbestandteile zur Partikelbelastung bei:

- partikuläre Abgasbestandteile, primär emittierte Partikel wie Russ (EC), hochsiedende organische Stoffgemische, Metalloxide
- gasförmige Abgasbestandteile, sogenannte Vorläufer sekundärer Partikel, die teilweise bereits an der Quelle in Partikel/Aerosole überführbar sind. Dazu zählen beispielsweise niedriger siedende organische Stoffgemische sowie deren Umwandlungsprodukte (wie oxidierte und nitrierte Verbindungen) zudem saure und alkalische Gase (SO_2 , NH_3 , NO_2/HNO_3) bzw. deren Umwandlungsprodukte (Salze).

A1-2 Anthropogene Emissionen aus Verbrennungsprozessen

Der messtechnische Zugang zur grossen Vielfalt von kohlenstoffhaltigen organischen Abgasbestandteilen ist anspruchsvoll. Die klare Trennung zwischen elementarem bzw. schwarzem Kohlenstoff und organischen Verbindungen ist nicht trivial. Je nach Analyse-methode beinhalten EC bzw. BC unterschiedliche Mengen von Kohlenstoff aus refraktären (hitzebeständigen) und gefärbten organischen Verbindungen (Herich 2011).

A1-2.1 Morphologie und chemische Zusammensetzung der partikulären Abgasbestandteile

Die Partikelemissionen von Dieselmotoren sind komplexe Gemische aus Russ, organischen Verbindungen inklusive polyzyklischen Aromaten, Stickstoff- und Schwefelverbindungen sowie Metalloxiden. Der grösste Teil der Partikel ist mit Mobilitätswindmessern von weniger als 1 µm lungengängig und damit erheblich gesundheitsrelevant. Menge und Zusammensetzung der emittierten Partikel von Dieselmotoren werden durch den Treibstoff (z.B. Schwefelgehalt), den Betriebszustand (Last, Drehzahl, Betriebstemperatur), das Motorenkonzept (Aufladung, Einspritzsteuerung, Abgasrückführung usw.) und das Abgasnachbehandlungssystem (Oxidationskatalysator, Russfilter, SCR-System) beeinflusst. Seit 2011 müssen Personen- und Lieferwagen mit Dieselmotor im Typenprüf-Fahrzyklus neben einem Partikelmassengrenzwert auch einen Anzahlgrenzwert von 6.0×10^{11} pro Kilometer einhalten. Für die Motoren der schweren Nutzfahrzeuge gilt ein solcher (8.0×10^{11} pro Kilowattstunde) ab Euro VI (2013/14)¹. Gleichzeitig wird dann der Grenzwert der Stickoxide, einer Vorläufersubstanz für sekundäre Partikel, nochmals halbiert.

Dieselmotoren

Ottomotoren weisen deutlich niedrigere Partikelemissionen als Dieselmotoren ohne Partikelfilter auf. Sie emittieren dank der sehr effektiven katalytischen Abgasnachbehandlungssysteme auch weniger NO_x. Bezüglich des Partikel-Emissionsverhaltens unterscheiden sich die heute noch weit verbreiteten Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung und die zunehmend an Boden gewinnenden Direkteinspritzer deutlich. Zwar sind die Ursachen für die Partikelbildung – Gemischbildungsdefizite (z.B. bei Schichtladung) und Wandauftrag – grundsätzlich dieselben, doch gibt es Unterschiede bezüglich Zusammensetzung – in beiden Fällen weniger Russ als bei Dieselmotoren, dafür einen deutlich höheren Relativanteil an organischem Kohlenstoff bei den Direkteinspritzern. Entsprechend den Entstehungsmechanismen fallen speziell die Partikelemissionen in der Kaltstartphase und bei den Motoren mit Saugrohreinspritzung auch während Beschleunigungsvorgängen ins Gewicht. Seit 2009/11 (Euro 5) gilt auch für Ottomotoren ein Massengrenzwert. Mit Blick auf die Eigenheiten der Direkteinspritzer werden diese ab 2014 (Euro 6) zusätzlich einem Anzahlgrenzwert von 6.0×10^{12} pro Kilometer unterstellt. Erst ab 2017 gilt derselbe Grenzwert wie für die Dieselmotoren. Da Ottomotoren mit direkter Einspritzung zwar den vorgesehenen Massengrenzwert einzuhalten vermögen, mit dem vorgesehenen Anzahlgrenzwert aber möglicherweise Mühe bekunden könnten und vor allem im realen Fahrbetrieb, ausserhalb der Betriebsbedingungen des Prüfzyklus, ein zahlenmässig Mehrfaches des Anzahlgrenzwertes emittieren, wird der Einsatz von Partikelfiltern bei dieser Art von Ottomotoren möglicherweise ebenso Standard werden wie bei den Dieselmotoren.

Benzinmotoren

Bei der Holzverbrennung werden unterschiedliche Arten von primären Partikeln erzeugt. Dazu gehören elementarer Kohlenstoff (EC/Russ), flüchtige und schwerflüchtige organische Verbindungen (wie Aldehyde, Carbonsäuren, oxidierte und nitrierte Aromaten, PAK und Teer) und anorganische Feststoffe (Metalloxide und Salze).

Holzfeuerungen

Bei den Partikelemissionen PM₁ von Holzfeuerungen bestehen grosse Unterschiede zwischen automatisch und nicht automatisch geregelten Kleinf Feuerungsanlagen. Die Unterschiede beziehen sich einerseits auf die Höhe der Partikelemission und andererseits auf deren chemische Zusammensetzung.

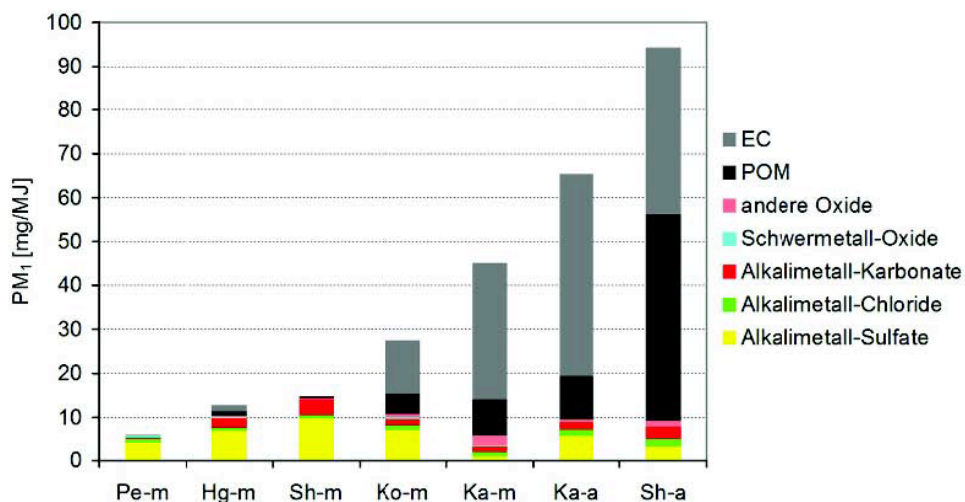
¹ Der erste Termin bezieht sich auf die Typenzulassung, der zweite auf die 1. Inverkehrsetzung von Neufahrzeugen

Feuerungen mit verbesserten Ausbrandbedingungen wie moderne Pellet-, Hackgut- und Stückholzkessel zeigen deutlich geringere Emissionen an organischem Kohlenstoff (OC) und Russ (EC) verglichen mit handbeschickten Naturzugöfen (Kaminöfen und Kachelöfen) oder Altanlagen. Moderne Pelletkessel emittieren im Vergleich mit alten Scheitholzkesseln bis zu einem Faktor 100 weniger Feinpartikel PM₁.

Je vollständiger die Verbrennung, umso weniger EC und kondensierende organische Verbindungen (OC bzw. OM) werden emittiert. Besonders hohe Emissionen entstehen in Anlagen, die handbeschickt und im Durchbrand (Abbrand von unten nach oben) betrieben werden und bei denen zusätzlich die Luftversorgung gedrosselt wird (Klippel 2007). Feinstaubproben aus schlechter Holzverbrennung weisen zudem mehr als die 20-fache Konzentration an polyzyklischen aromatischen Verbindungen (PAK) auf (Klippel 2007).

Abb. 1 > Typische chemische Zusammensetzung der Feinstaubemissionen

verschiedener Holzfeuerungen über typische Tagesverläufe. Elementarer Kohlenstoff EC, organische Kohlenstoffverbindungen (POM) und mineralische Bestandteile.



Quelle: Kelz 2012

Untersucht wurden folgende Feuerungsanlagen: Pe-m: Pelletkessel modern; Hg-m: Hackgutkessel modern; Sh-m: Stückholzkessel modern; Ko-m: Kachelofen modern; Ka-m: Kaminofen modern; Ka-a: Kaminofen mit veralteter Technologie (Billigprodukt); Sh-a: Stückholzkessel alt; Messung im verdünnten Rauchgas bei unter 40 °C

Die Bildung von anorganischen Aerosolen ist hauptsächlich von der Brennstoffzusammensetzung abhängig. Sie entstehen bei der Holzfeuerung hauptsächlich aus flüchtigen Brennstoffbestandteilen (besonders K, Na, S, Cl, Zn und Schwermetallspuren), die während der Verbrennung in die Gasphase übergehen. Im feuchten Abgas kommt es in der Folge zur Bildung von Alkalimetallsulfaten, -chloriden und -carbonaten sowie von Metalloxiden und -chloriden, die sich auf feinen Partikeln (z. B. Russ) ablagern können.

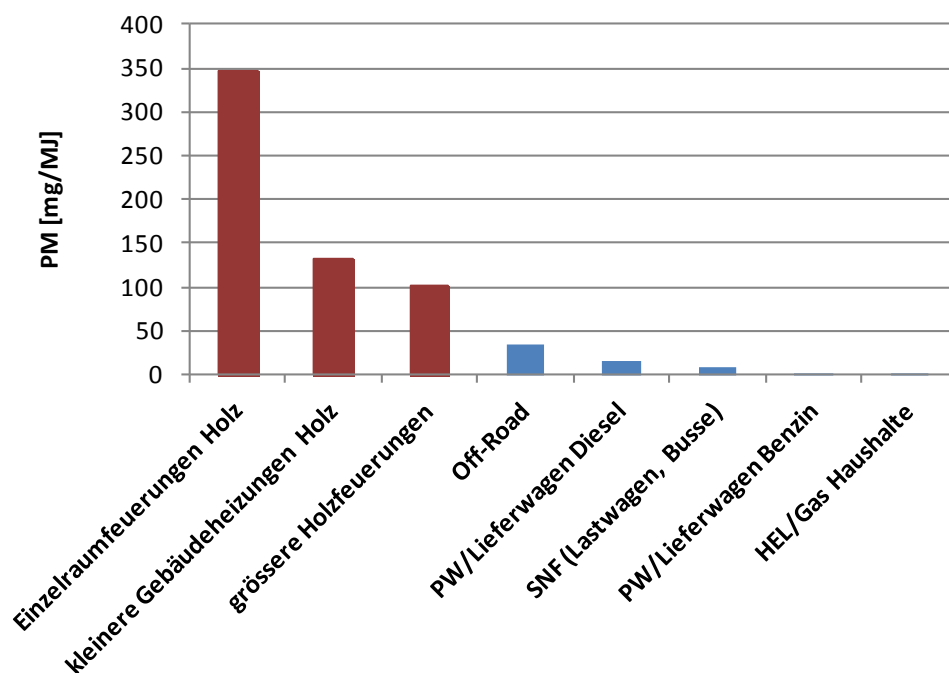
A1-2.2 Frachten partikulärer und kondensierbarer Anteile von Verbrennungsquellen

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der emittierten Partikel haben einen grossen Einfluss auf deren biologische Wirkung. Die Feinpartikel $< 1 \mu\text{m}$ aus Fahrzeug-Abgasen und Holzfeuerungen unterscheiden sich z.T. deutlich bezüglich Gröszenverteilung, Mikrostruktur, Zusammensetzung und PAK-Gehalt. Aufgrund der unterschiedlichen Temperatur- und Druckbedingungen der verschiedenen Verbrennungsprozesse ergeben sich auch Unterschiede bei der Bildung und Umwandlung der Partikel im Anlagenbereich (Nukleation, Oxidation und Kondensation).

Holzfeuerungen emittieren pro Energieeinheit massiv mehr Feinstaub als Motoren oder Öl- und Gasfeuerungen, wie die Abb. 2 veranschaulicht.

Abb. 2 > Feinstaubemissionen des schweizerischen Anlagen- und Fahrzeugparks pro Energieeinheit

durch Verbrennungsprozesse (inklusive kondensierende Bestandteile, ohne sekundären Feinstaub, ohne Abrieb und Aufwirbelung). Rote Säulen bezeichnen Holzfeuerungen, blaue Säulen Motoren (PW = Personenwagen, SNF = schwere Nutzfahrzeuge) sowie Heizungen mit Heizöl Extra Leicht (HEL) oder Gas.



Quelle: Emissionsinventar BAFU und Tabelle 2

Tab. 2 > Emissionen von Verbrennungsprozessen (Bezugsjahr 2010²)

Zahlen aufgrund offizieller Inventare; übrige Abschätzungen *kursiv*. Erhöhte Belastungen, die von anlagentechnischen Faktoren oder vom Fahr- und Betriebsverhalten abhängen, sind nachstehend nur beschränkt berücksichtigt. Nicht enthalten sind Motorräder, Öl- und Gasfeuerungen.

Verbrennungsquellen Kriterien	Verkehr				Holzfeuerungen		
	Benzin PW + Lieferwagen	Diesel PW + Lieferwagen	Nutz- fahrzeuge	Off-Road- Fahrzeuge und Geräte	Einzelraum- feuerungen	kl. Gebäude- heizungen	gröss. autom. Feuerungen
Anzahl (2010)	3 400 000	950 000	52 000	1 270 000	562 803	79 774	8 941
Quellentyp	Linie	Linie	Linie	Linie/Punkt	Punkt	Punkt	Punkt
Quellenaktivitäten			werktags	(werktags)	Heizperiode		
Nähe der Emissionen zur Bevölkerung	++	++	+	+	+++	++	++
Verbrauch Energieträger t pro Jahr (2010) ³ CH	2 680 000	1 043 000	682 000	384 000			
Energieverbrauch TJ pro Jahr (2010) ^{3,4} CH	114 000	45 000	29 000	16 000	8 657	9 780	15 751
Partikelemission t/a^{3,5,6}	180	690	270	540	3 000⁷	1 300⁷	1 600⁷
EC ⁸ t/a	30	410	200	400	900	780	1 450
OM t/a	150	280	70	140	2 100	500	100
PAK ⁹ t/a	0.08	0.06	0.04	0.00	5.8	4.8	1.4
gasförmige Emissionen							
NM VOC t/a	12 300	600	500	4 400	¹⁰ <	¹⁰ <	¹⁰ <
CO t/a	97 700	3 200	3 900	41 300	26 400	16 700	5 600
NO _x t/a	11 400	12 300	15 000	9 300	690	780	1 260
SO ₂ t/a	44	21	14	11	173 ¹¹	195 ¹¹	315 ¹¹
NH ₃ t/a	2 770	19	8	9	78	88	142

A1-2.3 Folgerungen

Eine wirksame Minderung der Feinstaubbelastung ist nur erreichbar, wenn partikelförmige (EC/OC), kondensierbare (OC/NM VOC) und gasförmigen Emissionen (NO_x, NM VOC, SO₂) aus Verbrennungsprozessen durch technische und betriebliche Massnahmen entscheidend gemindert werden. Zudem müssen auch Abrieb und Aufwirbelung sowie die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft so weit wie möglich reduziert werden.

Die rasche Erneuerung des Fahrzeugparks durch moderne, emissionsarme Fahrzeuge bzw. die Nachrüstung langlebiger dieselmotriebener Maschinen und Fahrzeuge mit wirksamen Russfiltern ist ein wichtiger Beitrag zur Senkung der Russbelastung. In diese Richtung wirken die Massnahmen des Aktionsplans Feinstaub von 2006 und die Anreize durch die LSVA. Noch nicht zufriedenstellend geregelt sind die Bereiche Traktoren und Notstromaggregate. Mit Euro 6 werden auch die NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen abnehmen. In einem weiteren Schritt wäre es nötig, die NM VOC-Emissionen von Benzin-PWs (Kaltstartemissionen) deutlich zu senken, um die Bildung von sekundären organischen Partikeln zu vermindern.

² Statistiken BfS und BAFU sowie Switzerland's Informative Inventory Report 2012 (BAFU)

³ Für Off-Road: Bezugsjahr Verbräuche und Bestände 2005; Quelle BAFU 2008, Umweltwissen UW-0828; Strassenverkehr: Abschätzungen aufgrund von BAFU 2010, Umweltwissen UW-1021

⁴ Holzenergiestatistik BFE 2011

⁵ Für Holzfeuerungen berechnet aus Emissionsfaktoren (EF) (Nussbaumer 2008 bzw. BAFU 2005); Einzelraumfeuerungen (v. a. handbeschickt) Kategorie 1–6: EF NM VOC 400 kg/TJ, Staub 150 kg/TJ; kleinere Gebäudeheizungen (automatisch/handbeschickt, naturbelassenes Brennholz) Kategorie 7–12: NM VOC 50 kg/TJ, Staub 100 kg/TJ; grössere automatische Feuerungen Kategorie 13–18: EF NM VOC 15 kg/TJ, Staub 100 kg/TJ

⁶ Strassenverkehr: Aufteilung in EC/OM aufgrund von Literaturdaten EMPA (Schreiber 2007)

⁷ Summe Staub + ½ NM VOC (Annahme: Hälfte der NM VOC sind kondensierende)

⁸ Zahlen können bei Holzfeuerungen auch Anteile von Mineralstoffen enthalten

⁹ Umfasst Benzo(a)pyren, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Indeno(1,2,3-cd)pyren

¹⁰ kondensierbarer Anteil bei Holzfeuerungen kann dem OM zugerechnet werden

¹¹ vorzugsweise als Sulfat

Damit der Ausstoss von Feinstaub, EC und OC in Siedlungsgebieten besonders während der Heizperiode (Wintersmogphase) markant verringert werden kann, müssen sich die Anforderungen an Holzheizungen am besten Stand der Technik orientieren. Als Heizungen sind nur noch solche Holzfeuerungen zu tolerieren, die einen guten Wirkungsgrad aufweisen sowie technisch und betrieblich in allen Betriebsphasen eine optimale Verbrennung mit ausreichendem Ausbrand sicherstellen.

Offene und geschlossene Cheminées sind energetisch und feuerungstechnisch so schlecht, dass sie gestützt auf die LRV nicht mehr länger als Heizsysteme toleriert werden dürfen. Zudem ist die Betriebsweise von Einzelraumfeuerungen mit integrierem Speicher auf kurze, energetisch und lufthygienisch vertretbare Heizphasen zu beschränken (in der Regel eine Speicherladung pro Tag). Kritische Stoffe mit einem hohen Anteil an Aerosolbildnern (Rinde, Altholz, Stroh und dergleichen) sind nur in dafür zugelassenen Grossanlagen mit wirksamer Feinstaubabscheidung einzusetzen.

A1-3 Übrige Quellen (nicht Verbrennung)

Zusätzlich zu den Verbrennungsprozessen entsteht Feinstaub auch durch Abrieb, Aufwirbelung und sekundäre Bildung in der Atmosphäre aus Vorläufergasen. Abrieb entsteht hauptsächlich durch Fahrzeuge: Bremsabrieb von Strassen- und Schienenfahrzeugen, Strassen- und Schienenabrieb, Reifenabrieb, Radabrieb von Schienenfahrzeugen und Fahrleitungsabrieb durch Bahnen, Trams und Trolleybusse. Aufwirbelungsemissionen entstehen vor allem anthropogen auf Strassen, Baustellen und landwirtschaftlich bearbeiteten Flächen sowie bei Ställen. Natürliche Winderosion spielt bei den klimatischen Verhältnissen der Schweiz eine untergeordnete Rolle, ebenso Feinstaub aus Meeresgisch.

Sekundärer Feinstaub macht rund die Hälfte der gesamten PM₁₀-Belastung aus (Hüglin 2012). Er entsteht durch chemische Umwandlung (Oxidation und Säure-Base-Reaktionen, in wässriger Phase – d. h. Nebel- und Wolkentröpfchen, feuchten Feinstauboberflächen – oder in der Gasphase mit anschliessender Kondensation) aus den Vorläuferschadstoffen Schwefeloxiden (SO₂, SO₃), Stickoxiden (NO, NO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC) und Ammoniak (NH₃). Dadurch bilden sich Ammoniumnitrat (NH₄NO₃), Ammoniumsulfat ((NH₄)₂SO₄) und schwerer flüchtige organische Verbindungen (Säuren, Polymere etc.). Ein Teil der Vorläufergase, insbesondere Schwefel- und Stickoxide, stammen aus Verbrennungsprozessen, der andere Teil aus Verdunstung und Verflüchtigung (insbesondere Ammoniak).

A1-4 Räumliche Verteilung verschiedener Feinstaub-Komponenten

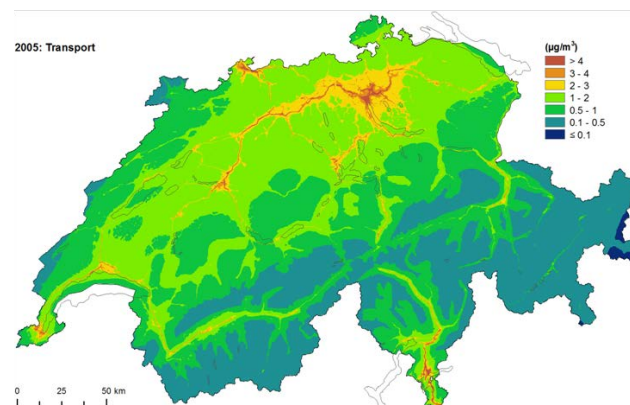
Aufwirbelungs- und Abriebsemissionen stammen hauptsächlich aus Linien- oder Punktquellen. Die entstehenden Partikel sind eher grob, sie liegen daher im oberen Grössenbereich des PM₁₀. Ihre Konzentration nimmt mit zunehmender Entfernung von der Quelle durch Verdünnung und Deposition rasch ab (ASTRA 2009; Infras 2007). Entsprechend gross sind die räumlichen Konzentrationsunterschiede derartiger Feinstäube: Die Belastungsunterschiede zwischen Strassenschluchten und städtischem Hintergrund oder im Luv und Lee stark befahrener Strassen sind zu einem wesentlichen Teil auf die Abriebs- und Aufwirbelungsemissionen des Strassenverkehrs zurückzuführen (ASTRA 2003).

Starke räumliche Unterschiede werden auch bei ultrafeinen Partikeln (Grösse unter $0.1\ \mu\text{m}$) aus Verbrennungsprozessen beobachtet. Wie Aufwirbelung und Abrieb stammen sie aus Linien- oder Punktquellen. Ihre Anzahl nimmt mit zunehmender Entfernung von der Quelle durch Verdünnung und Koagulation rasch ab. PM₁₀-Belastungen durch motorische Emissionen, Abrieb und Aufwirbelung des Verkehrs bilden deshalb die Verkehrsströme ab (Abb. 3, BAFU 2013).

Die Bildungsprozesse von sekundärem Feinstaub laufen nicht nur am Ort der Emission der Vorläufergase ab, sondern in der ganzen Atmosphäre, wo die Vorläuferstoffe und Reaktionspartner in genügender Konzentration vorhanden sind. Es handelt sich um eine grösserräumige, relativ homogene Bildung von feineren Partikeln (unter $1\ \mu\text{m}$). Entsprechend homogen sind auch die Verhältnisse dieser Feinstaubbestandteile zueinander und ihre Konzentration im Schweizer Mittelland. An höher gelegenen Messstellen, insbesondere in Gebieten oberhalb der winterlichen Inversionsschicht, sind die Konzentrationen wesentlich niedriger. Abb. 4 stellt das am Beispiel von partikelförmigem Nitrat (NO_3) dar (BAFU 2013).

Abb. 3 PM₁₀-Konzentrationen Verkehr

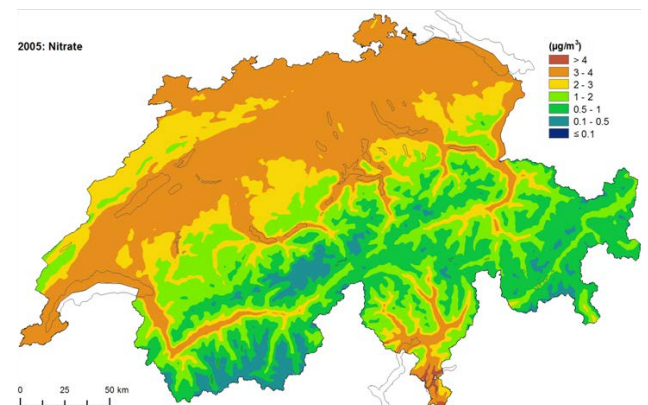
aufgrund von partikulären Verkehrsemissionen im Jahr 2005; Modellauflösung 200 m x 200 m



Quelle: BAFU 2013

Abb. 4 Nitratkonzentrationen im PM₁₀

im Jahr 2005; Modellauflösung 200 m x 200 m



A1-5 Jahreszeitliche Abhängigkeit der Feinstaubbestandteile

Meteorologie, Emissionsverhalten verschiedener Quellen (z. B. Feuerungen) und chemisch-physikalische Bedingungen für die Feinstaubbildung variieren mit den Jahreszeiten. Daraus resultieren – mit Ausnahme von höher gelegenen Standorten über der winterlichen Inversionsschicht – höhere Feinstaubkonzentrationen im Winterhalbjahr als im Sommerhalbjahr. Projektweise ermittelte Informationen über die chemische Zusammensetzung des Feinstaubs (Hüglin 2012) lassen Schlüsse auf die Jahresgänge verschiedener Inhaltsstoffe zu.

Die Konzentrationen von Mineralstaub sind gering und weisen keine jahreszeitliche Abhängigkeit auf. Seltene spezielle Ereignisse wie der Transport von Saharastaub in die Schweiz können aber zu kurzfristig massiv erhöhten Konzentrationen führen.

An denjenigen Standorten, wo der Verkehr eine deutlich grössere Rolle spielt als die Holzfeuerungen, ist auch bei Russ (EC) kein jahreszeitlicher Trend ersichtlich. Hinge-

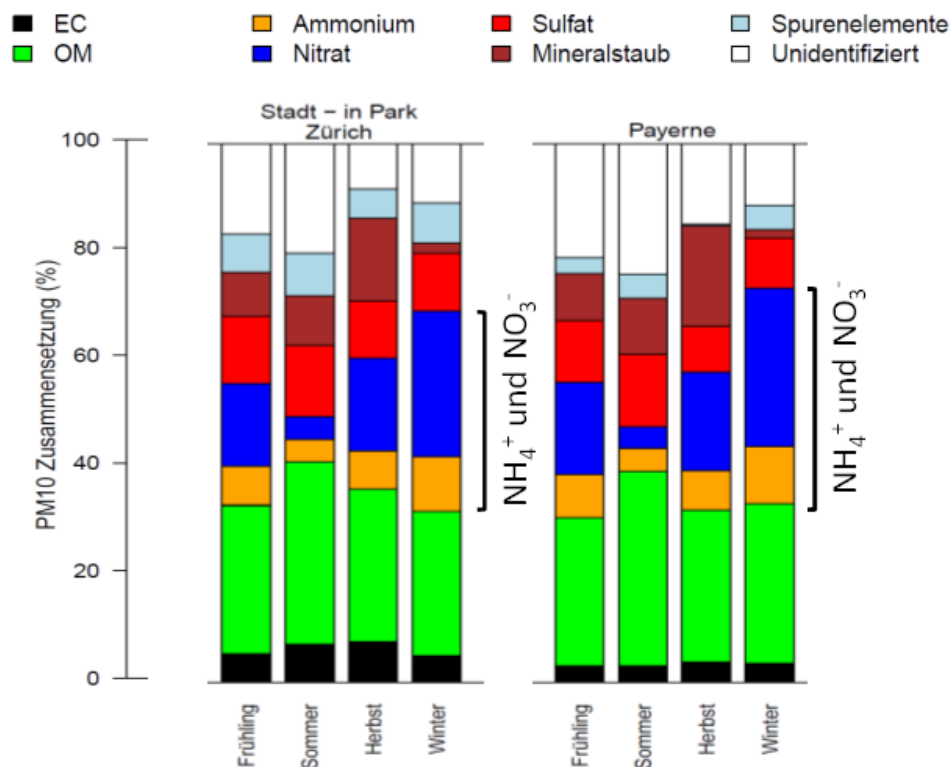
gen sind an Standorten mit vergleichbarem oder grösserem Einfluss der Holzverbrennung die Russkonzentrationen in der Heizperiode erhöht.

Sulfat und organische Verbindungen zeigen an den meisten Messstellen ebenfalls erhöhte Konzentrationen im Winter.

Den deutlichsten Jahresgang weisen auf der Alpennordseite Nitrat und das damit gekoppelte Ammonium auf, mit sehr geringen Konzentrationen im Sommer und sehr hohen Werten im Winter. Ihr Anteil am PM10 erreicht im Winter etwa 40 % (vgl. Abb. 5 relative Zusammensetzung des Feinstaubs im Schweizer Mittelland). Auf der Alpensüdseite, wo die Holzfeuerungsmissionen eine noch wichtigere Rolle spielen als auf der Alpennordseite, weisen Russ (EC) und organisches partikuläres Material (OM) einen starken Jahresgang auf und tragen im Winter etwa 60 % zum PM10 bei.

Abb. 5 > Prozentuale Zusammensetzung des Feinstaubs PM10

an den NABEL-Standorten Zürich Kaserne und Payerne in den vier Jahreszeiten. Mitte 2008 bis Mitte 2009.



Quelle: Hüglin 2012

A2 Gesundheitliche Auswirkungen

A2-1 Gesundheitliche Folgen der Feinstaubbelastung, gemessen mit PM2.5 und PM10

Die neueren epidemiologischen Untersuchungen haben die Evidenz für die gesundheitlichen Folgen der Feinstaubbelastung seit 2007 (letzter Feinstaubbericht der EKL) verstärkt. Die Palette der untersuchten Gesundheitswirkungen reicht von den zugrundeliegenden pathophysiologischen Wirkungspfaden über kognitive Beeinträchtigungen und die negative Beeinflussung von geburtlichen Zielgrössen, das Lungenwachstum von Kindern, über Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen und einer erhöhten Zahl von Asthmafällen und Allergien bis hin zur erhöhten Sterblichkeit. Tab. 3 fasst die gesicherten Wirkungen auf die Gesundheit zusammen. In Diskussion stehen die Beeinflussung der vorgeburtlichen Entwicklung (Frühgeburt, Geburtsgewicht) sowie die Beeinflussung der neurologischen Entwicklung und der Hirnleistung.

Tab. 3 > Zusammenstellung der gesicherten, mit den Feinstaubindikatoren PM10 oder PM2.5 verbundenen gesundheitlichen Folgen

Pathophysiologisch	• örtliche Entzündungserscheinungen in den Atemwegen, angezeigt z. B. durch Einstrom von neutrophilen Granulozyten • Hemmung der Funktion der Abwehrzellen in der Lunge • Förderung der allergischen Disposition • Veränderungen der Steuerung des Herzrhythmus • Veränderungen von Bluteigenschaften (Gerinnung, Entzündungsparameter) • Veränderungen der Gefässwandfunktion
Kurz- und mittelfristige Folgen	• Verschlechterung des Befindens bei Personen mit Asthma und chronischer Bronchitis • Häufung von Infektionskrankheiten der Atemwege bei Kindern • Zunahme der Spitaleintritte wegen Herz- und Lungenkrankheiten • höhere Sterblichkeit von Säuglingen an Atemwegserkrankungen • Zunahme der Sterbefälle wegen Herz- und Lungenkrankheiten
Langfristige Folgen	• Verschlechterung der Lungenfunktion und geringeres Lungenwachstum bei Kindern • Geringere Lebenserwartung wegen Herz- und Lungenkrankheiten inklusive Lungenkrebs

Für die Diskussion einer möglichen Verschärfung des PM10-Grenzwertes oder der Einführung eines PM2.5-Grenzwertes werden nachfolgend Studien zusammengefasst, welche gleichzeitig beide Grössen untersucht haben.

Es gibt nur drei europäische Kohortenstudien, bei denen die Folgen von PM2.5 und PM10 vergleichbar analysiert wurden. Sie fanden etwa die gleich starken Zusammenhänge mit der Gesundheit (Raaschou-Nielsen 2013, Naess 2007, Oftedal 2008). Die europäischen Querschnittstudien fanden insgesamt etwas engere Zusammenhänge der untersuchten Gesundheitsgrössen mit PM2.5 als mit PM10 bei vergleichbarer Belastung. Wenige der vielen amerikanischen Studien haben die beiden Partikelindikatoren vergleichbar analysiert. Die Folgen werden für PM2.5 meist höher beziffert als für PM10, aber nicht immer.

**Langfristige Folgen
der PM10- und PM2.5-
Belastung**

Europäische Studien, welche die kurzfristigen Wirkungen beider Feinstaubgrössen untersuchen, zeigen manchmal stärkere Einflüsse von PM10, manchmal von PM2.5, oft auch gleich starke Einflüsse. Die Ergebnisse hängen auch von der betrachteten Krankheit oder physiologischen Grösse ab. So fanden europäische Studien, welche die

**Kurzfristige Folgen
der PM10- und PM2.5-
Belastung**

Sterblichkeit in Abhängigkeit der kurzfristigen Feinstaubbelastung untersuchten, häufiger signifikante Effekte für PM₁₀ bzw. die größeren Partikel als für PM_{2.5}. Die Spitaleintritte oder -konsultationen hingen teilweise mit PM₁₀, teilweise mit PM_{2.5} oder mit beiden zusammen, in Abhängigkeit der betrachteten Krankheiten.

Die größeren Anteile von PM₁₀ sind noch wenig in gesundheitlichen Studien als Bezugsmass verwendet worden (20 europäische Publikationen zu kurzfristigen Folgen, keine zu langfristigen Folgen). Eine ganze Reihe europäischer Studien hat gezeigt, dass auch die gröbere Fraktion mit akuten Folgen für die Gesundheit verbunden ist, zum Beispiel mit der Sterblichkeit und vor allem mit Atemwegskrankheiten und Asthmanotfällen.

Größere Partikel
(zwischen 2.5 und 10 µm)

Langzeitstudien stellen im Allgemeinen keine Schwellenkonzentrationen für PM₁₀ oder PM_{2.5} fest, unter denen keine Wirkungen mehr gefunden werden. Dies gilt auch für die Schweizer Studien SCARPOL und SAPALDIA (z. B. Bayer-Oglesby 2005, Schindler 2009). Einzig in der norwegischen Studie von Naess 2007 gab es Hinweise, welche allenfalls als «Schwellenwert» von 14 µg/m³ PM_{2.5} respektive 19 µg/m³ PM₁₀ interpretiert werden könnten. Erst über diesen Werten nahm die Sterblichkeit mit zunehmender Partikelbelastung zu. Keinen derartigen Schwellenwert fand die kürzlich erschienene Analyse des Grossprojektes ESCAPE mit Daten von über 300 000 Teilnehmern an 22 europäischen Langzeitstudien (inklusive SAPALDIA). ESCAPE zeigt klare Zusammenhänge zwischen individuell abgeschätzten PM_{2.5}-Langzeitbelastungen der Wohnadresse und der Sterblichkeit. Dies war auch bei jener Gruppe sichtbar, welche Belastungen von höchstens 15 µg/m³ ausgesetzt war (Beelen 2013).

Wirksschwellen

Für Kurzzeiteffekte werden in europäischen und aussereuropäischen Studien ebenfalls kaum Schwellen gefunden. Bei der überwiegenden Mehrzahl der Studien nahmen die Gesundheitsfolgen linear mit der Belastung zu oder ab.

Die kurzfristigen Folgen der Luftschadstoffe sind einfacher zu belegen und bereits seit vielen Jahren etabliert, während die Untersuchung der Langzeitfolgen aufwendiger ist. Deshalb wurden letztere weniger ausgedehnt erforscht. Bei der Beurteilung der Bedeutung dieser Gesundheitsrisiken in der Bevölkerung (d. h. gesamte Gesundheitsschäden, Kosten etc.) dominieren die Langzeitfolgen jedoch deutlich (Pope 2007 und Brook 2010).

Langfristige Folgen
gegenüber kurzfristigen
Folgen

A2-2 Gesundheitliche Folgen, die mit anderen Indikatoren für Partikel verbunden sind

Besondere Beachtung muss der Erfassung der feinsten Partikelfraktion geschenkt werden. Anders als die Partikel in Mikrometergrösse sind Partikel unter etwa 500 nm in der Lage, Zellen und Gewebe zu durchdringen. Sie können durch die Luft-Blut-Gewebeschanke in das kapilläre Blut zu gelangen und damit in alle Organe transportiert werden. Damit haben die kleinsten Partikel das Potenzial, die Gesundheit über andere Mechanismen zu schädigen als dies für die grösseren Partikel beschrieben wird.

A2-2.1 Partikelzahl

In Zell- und Tierexperimente wiesen ultrafeine Partikel eine höhere Toxizität auf als dieselbe Masse von Partikeln derselben chemischen Zusammensetzung, aber mit einem Durchmesser im Mikrometerbereich. Sie bewirkten eine massivere Entzündung in den

Zell- und Tierexperimente

Atemwegen, durchdrangen Zellmembranen und schädigten die Abwehrzellen in den Lungen. Dies führte zur Hypothese, dass es die ultrafeinen Partikel seien, die für die Herz-/Kreislaufkrankheiten verantwortlich seien, welche bei schlechter Luftqualität in Bevölkerungsstudien vermehrt beobachtet werden.

Die Bedeutung der grösseren Oberfläche der kleinsten Partikel pro Masse für die Toxizität wurde in Zellexperimenten mehrfach bestätigt. Die Fähigkeit zur Erzeugung von oxidativem Stress und zur Auslösung eines Entzündungsprozesses hängt aber auch von der chemischen Zusammensetzung ab. Ein alarmierendes Ergebnis von Tierstudien war die Fähigkeit der ultrafeinen Partikel, von den Atemwegen in den Kreislauf und von der Nase über die Geruchsnerve ins Gehirn einzudringen (Geiser 2005; Kreyling 2002; Oberdörster 2004; Rothen-Rutishauser 2007; Semmler 2004). Mäuse, welche langdauernd mit ultrafeinen Partikeln belastet wurden, zeigten auch eine verstärkte Arteriosklerose der Aorta.

In Experimenten mit Versuchspersonen bestätigten sich die grössere Ablagerung und die längere Verweildauer ultrafeiner Partikel in den Lungen. In den getesteten Konzentrationen gab es kaum Wirkungen auf die Atemwege, hingegen zeigten sich teilweise Veränderungen bei den Gefässfunktionen und bei der Regulierung des Herzrhythmus. Es konnte aber nicht gezeigt werden, dass diese Folgen anders waren als bei grösseren Partikeln. Die Studien an Menschen konnten den Übergang von ultrafeinen Partikeln in den Kreislauf bisher nicht nachweisen und sie waren auch nicht schlüssig, ob Partikel via Nase ins Gehirn eindringen können. Deshalb ist vorläufig nicht klar, ob eine solche Translokation unabhängig von der chemischen Zusammensetzung der Partikel stattfindet und wie bedeutend dieser Vorgang beim Menschen ist. Allerdings könnten die Langzeitfolgen gross sein.

**Experimente mit
Versuchspersonen**

Die Auswirkungen der feinsten Partikelfractionen in der Umgebungsluft wurden in der Allgemeinbevölkerung fast immer mit dem Indikator der Partikelzahl untersucht. Neben den ultrafeinen Partikeln liefern auch die Partikel in den Grössenfraktionen zwischen 100 nm und 1 µm einen Beitrag zur Partikelzahl. Vereinzelt wurde die Oberfläche spezieller Grössenfraktionen oder das oxidative Potenzial verwendet.

**Partikelanzahl und
Gesundheitsschäden in
Bevölkerungsstudien**

Die Zahl der täglichen Todesfälle schwankte in einigen Studien parallel zur Anzahl Partikel in der Luft, in anderen aber nicht oder nicht deutlich. Dasselbe wurde für die Zahl der notfallmässigen Arztkonsultationen und Spitaleintritte wegen Herz- und Lungenkrankheiten beobachtet. So nahmen in einer europäischen Studie die Spitaleinweisungen wegen Herzinfarkten mit steigender Zahl der Partikel unter einer Grösse von 0.1 µm in drei Städten zu, in den zwei anderen jedoch nicht. Über die Gesamtheit aller fünf Städte gesehen bestanden die engsten Beziehungen zur Kohlenmonoxid-Konzentration (Lanki 2006).

Viele ähnliche Studien mit Registerdaten berichten Beziehungen von Krankheitsfällen mit den Partikelzahlen, aber nicht immer mit denselben Krankheiten und nicht immer in denselben Bevölkerungs- oder Altersgruppen. Andere Studien fanden dies für die gleichen Krankheiten nicht. In fast allen Studien hingen die Krankheiten auch mit anderen Schadstoffen zusammen und es war nicht möglich, die Folgen nur der Anzahl der Partikel oder einer bestimmten Grössenfraktion zuzuschreiben.

Ebenso gemischt sind die Ergebnisse von Studien, welche die Gesundheit und die Partikelbelastung individuell bei speziell ausgewählten Studienpersonen über eine bestimmte Zeit engmaschig kontrollierten. Zwar gab es parallel zur Zahl der Partikel Veränderungen bei der Regulierung des Herzrhythmus, des Blutdrucks oder der Gefässfunktion und der Konzentration von Blutbestandteilen, die für Entzündungszu-

stände oder Gerinnungsprozesse typisch sind. Aber die Ergebnisse waren nicht konstant, oft wiesen andere Partikelfractionen oder gasförmige Schadstoffe dieselben Beziehungen auf.

Langzeitstudien, welche die gesundheitlichen Folgen mit der Partikelzahl in Beziehung setzen konnten, gibt es noch nicht.

Die Schwierigkeit, gesundheitliche Folgen der Partikelzahl in Bevölkerungsstudien nachzuweisen, hängt vermutlich nicht mit der fehlenden Wirkung zusammen sondern mit den starken räumlichen Schwankungen der Partikelzahlen. Wenn die Partikelzahlen an einer festen Messstelle erfasst werden, entsprechen die dort gemessenen Konzentrationen der Belastung der Bevölkerung schlecht (s. Anhang A1-4, A3-2).

Die Zahl der Partikel oder die Fraktion der Partikel unter $0.1\ \mu\text{m}$ sind daher sicher nicht allein verantwortlich für die gut bekannten Folgen des eingeatmeten Feinstaubes. Sie könnten aber zusätzliche und teilweise unabhängige Wirkungen haben.

A2-2.2 Black Carbon BC und elementarer Kohlenstoff EC

Experimentelle Untersuchungen zur Auswirkung des kohlenstoffhaltigen Anteils der Partikel aus der Umgebungsluft werden entweder mit reinen Kohlenstoffpartikeln, mit konzentrierten Partikeln aus der Aussenluft mit einem hohem Anteil von ultrafeinen Partikeln oder mit Partikeln aus Verbrennungsprozessen (wie Dieselmotorabgas) durchgeführt.

Experimentelle
Untersuchungen an
Menschen

Reine Kohlenstoffpartikel im ultrafeinen Bereich haben bis zum Zehnfachen der Konzentrationen, die in der Umgebungsluft vorkommen, keine Auswirkungen auf den Entzündungszustand in den Atemwegen und höchstens minimale Änderungen der Gefässfunktionen und der Gerinnungsfaktoren im Blut zur Folge. Der Kohlenstoffgehalt von konzentrierten Partikeln aus der Umgebungsluft variiert und ist manchmal gering. Bei Konzentrationen von bis zu $200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM wurden ebenfalls geringfügige Änderungen der Gefässfunktionen beobachtet. Bei Studien mit Dieselmotorabgas, welche Partikelkonzentrationen von etwa $300\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem hohen Anteil an ultrafeinen Partikeln enthielten, fanden sich vermehrte Entzündungszeichen, und bei Personen mit Asthma ein höherer Luftwiderstand in den Atemwegen. Ferner war die Auflösung von Fibrin verzögert, der Herzmuskel schlechter durchblutet und die Regulierung der Gefässe verändert. Studien, welche Dieselmotorabgas mit und ohne Partikelfilter sowie reine Kohlepartikel bezüglich Gesundheitswirkungen verglichen, beobachteten, dass die Verschlechterung der Gefässfunktion nur mit ungefiltertem Dieselmotorabgas zustande kam. Das gefilterte Abgas und die ultrafeinen Kohlenstoffpartikel allein beeinflussten die Gefässfunktion nicht (Mills 2011).

Dies legt nahe, dass die Auswirkungen hinsichtlich Gefässfunktion auf kohlenstoffhaltige Partikel im Grössenbereich unter $1\ \mu\text{m}$ zurückzuführen sind, und dass diese Folgen nicht direkt mit dem Kohlenstoff zusammenhängen sondern mit anderen Partikelbestandteilen wie Metallen oder organischen Stoffen, die am Kohlenstoffkern adsorbiert sind. Es wurde nicht untersucht, ob sich diese Wirkungen auf kohlenstoffhaltige Partikel unter $1\ \mu\text{m}$ Grösse beschränken oder auch bei grösseren kohlenstoffhaltigen Partikeln auftreten.

Black Carbon (BC) und elementarer Kohlenstoff (EC) werden wahlweise in vielen Bevölkerungsstudien als Indikatoren für frische Verbrennungspartikel bzw. Russ gebraucht, besonders in Studien an speziell empfindlichen Personen wie Herz- oder

Bevölkerungsstudien zu
kurzfristigen Folgen

Bronchitispatienten. In manchen Studien wurden die Teilnehmer mit tragbaren Messgeräten ausgerüstet oder die Belastung an ihrer Wohnadresse wurde individuell mit geografischen Modellen ermittelt. Die so berechnete Belastung war mit Rhythmusstörungen, Zeichen von Minderdurchblutung des Herzmuskels und Änderungen der Herzrhythmusregulierung verbunden. Auch die Zahl der Todesfälle, Spitaleintritte und Notfälle wegen Herz- und Lungenkrankheiten gingen mit BC und EC parallel. BC und EC repräsentieren einen Teil der Partikelmasse. Wie deshalb zu erwarten ist, sind die Effektschätzer pro Mikrogramm Masse höher als für die umfassenderen Indikatoren PM_{2.5} oder PM₁₀, da ja ihre Konzentration viel tiefer ist. Wenn ihre Folgen aber nicht pro Masse, sondern über den Streubereich der Belastung verglichen werden (zum Beispiel der Unterschied zwischen den 10 % der Personen mit der tiefsten Belastung und den 10 % mit der höchsten Belastung in derselben Region), dann sind die Folgen ähnlich (Janssen 2011).

Die räumliche Verteilung der ultrafeinen Partikel, von BC oder EC ist von den Quellen abhängig und schwankt entsprechend stark. Die Erfassung der individuellen Belastung ist deshalb viel wichtiger, als für die gleichmässiger verteilten Feinstaubindikatoren PM₁₀ und vor allem PM_{2.5}. Dies gilt gerade für Studien über langfristige Gesundheitsfolgen, die entsprechend aufwendig sind. Im Hinblick auf die grössere Ablagerung und längere Verweildauer der ganz feinen Partikel in den Atemwegen und ihr Potenzial, via Kreislauf alle Organe zu erreichen, sind die langfristigen Konsequenzen jedoch von höchster Bedeutung.

Langfristige Folgen, die mit EC oder BC verbunden sind

In Kalifornien und in deutschen und niederländischen Studien wurden Kinder über mehrere Jahre bezüglich Atemwegsgesundheit nachkontrolliert, in den europäischen Studien von Geburt auf. Im Vordergrund standen ihr Lungenwachstum und das Risiko, Asthma zu entwickeln. Mit ansteigender Konzentration von kohlenstoffhaltigen Partikeln, aber auch von NO₂ und anderen Schadstoffen aus dem Verkehr verlangsamte sich das Wachstum der Lunge und vergrösserte sich das Risiko, Asthma zu bekommen. In diesen Kinderstudien wurde die Lichtabsorption auf PM_{2.5}-Filtern gemessen, die an Verkehrsstandorten sehr eng, in ländlichen Verhältnissen weniger eng mit den EC-Konzentrationen korrelierten.

Die Autoren schreiben die Einwirkung der Verkehrsbelastung zu (Gehring 2010; Gaudermann 2004). Selbstverständlich wurden in all diesen Langzeitstudien weitere Einflussfaktoren auf die Gesundheit wie das Alter, die Schulbildung, der Beruf, der Lebensstandard und individuelle Gewohnheiten wie Rauchen, Ernährung und körperliche Aktivitäten einbezogen. Die beobachteten Zusammenhänge mit Verkehrsbelastungen lassen sich folglich nicht durch diese Faktoren erklären.

Eine soeben erschienene Übersicht über das langfristige Sterberisiko in Abhängigkeit von verschiedenen Luftschadstoffen hat die Ergebnisse für Russ aus sieben Langzeitstudien in einer Metaanalyse zusammengerechnet (Hoek 2013). Vier Studien benutzten EC als Belastungsgrösse und drei Black Smoke (ein weiteres Schwärzungsmass). Black Smoke wurde mit einem fixen Umrechnungsfaktor in EC konvertiert. So kombiniert, fand das Forschungsteam ein zusätzliches Sterberisiko von 6 % (95 %-Vertrauensgrenzen 5–7 %), wenn die EC-Belastung um 1 µg/m³ höher war. Die Ergebnisse einzelner Studien waren nicht signifikant, die Beziehung war aber in allen linear. Das bedeutet, dass das Risiko mit steigender Belastung konstant zunimmt. Die durchschnittlichen EC-Belastungen der einzelnen Studienteilnehmer lagen im Bereich 0.4–1.1 µg/m³. Eine amerikanische Studie, welche das Risiko der Belastung den nächsten fest installierten Messstationen zuordnete, gab einen Belastungsbereich von 0.1–2.0 µg EC/m³ an mit einem Durchschnitt von 0.6 µg/m³. Die Belastungssituation in

diesen Studien ist somit direkt vergleichbar mit jener in der Schweiz (siehe Anhang A3, Abb. 16).

Leider gibt es bisher keine Studien in der Allgemeinbevölkerung, welche ein Mass für ultrafeine Partikel oder elementaren Kohlenstoff mit dem Risiko für Lungenkrebs in Beziehung setzen konnten. Das Risiko für Lungenkrebs nahm in vielen Studien parallel zur Belastung mit PM₁₀, PM_{2.5} oder mit den Stickoxiden zu, teilweise auch mit ansteigender Verkehrsbelastung der Wohnadresse. Die Ergebnisse waren aber oft nicht signifikant. In der neustens erschienen, gemeinsamen Analyse der europäischen Kohortenstudien ESCAPE war die Häufigkeit von Lungenkrebs signifikant mit der PM₁₀-Belastung, aber nicht signifikant mit der Lichtabsorption der PM_{2.5}-Partikel (ein Indikator für Russ oder Black Carbon) verbunden (Raaschou-Nielsen 2013). Zum statistischen Nachweis von selteneren Todesursachen braucht es einerseits sehr grosse Kohorten, andererseits müssen räumliche Unterschiede in der Belastung über lange Zeit genau erfasst werden. Eine grössere Lungenkrebshäufigkeit wurde aber schon lange bei Arbeitnehmern mit hoher beruflicher Dieselmotorabgasbelastung nachgewiesen, zum Beispiel bei Berufsfahrern (Coi 2012). Das Lungenkrebsrisiko von Arbeitern in Bergwerken, in denen die EC-Konzentrationen gemessen und damit die langjährigen Belastungen berechnet worden waren, nahm mit steigender Belastung zu, mit einer (zu erwartenden) Verzögerung von etwa 15 Jahren. Gestützt auf diese Ergebnisse hat die internationale Agentur für Krebsforschung im Jahr 2012 Dieselmotorabgase in die Gruppe der Substanzen mit gesichertem Krebsrisiko (Kategorie 1) eingeteilt (IARC 2012).

A2-2.3 Weitere Indikatoren für die langfristigen Folgen partikulärer Luftbelastung

In manchen Kohortenstudien wurde parallel zum elementaren Kohlenstoff EC auch die Masse des **organischen Kohlenstoffs OC** bezüglich langfristiger Folgen wie zum Beispiel das Sterberisiko oder das Lungenwachstum bei Kindern untersucht. OC war jeweils korreliert mit anderen Schadstoffen aus dem Verkehr und die Effekte konnten nicht eindeutig zugeordnet werden. Ebenso wurde die Massenkonzentration von **polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen PAK** mit Langzeitfolgen in Verbindung gebracht: Die vorgeburtliche oder frühkindliche Entwicklung hing teilweise mit den PAK zusammen, aber nicht enger als z.B. mit PM₁₀. In der einzigen Studie über die Lebenserwartung hing diese eher weniger eng mit den PAK zusammen als mit anderen Feinstaubgrössen. In arbeitsmedizinischen Studien wurde deutlich, dass eine steigende Belastung mit **Benzo(a)pyren** (als Indikator für die kanzerogene Wirkung der PAK) zu einem grösseren Risiko für Lungenkrebs führt, in Bevölkerungsstudien wurde das bisher nicht gezeigt. Weitere in Bevölkerungsstudien verwendete Partikelindikatoren sind die **Partikeloberfläche** und das **oxidative Potenzial** der Partikel. Zum letzteren gibt es nur eine einzige Langzeit-Studie, welche fand, dass ein Anzeichen für Arteriosklerose stärker mit der Massenkonzentration von PM₁₀ zusammenhing als mit dem oxidativen Potenzial von PM₁₀. Insgesamt sind die wissenschaftlichen Grundlagen zur Beurteilung dieser weiteren Grössen spärlich, besonders in Bezug auf die hier interessierenden Langzeitfolgen. Ob die Ergebnisse der speziellen Studiensituationen überhaupt auf die Schweiz überragen werden könnten, ist fraglich.

A2-2.4 Bedeutung bezüglich Luftqualitätsmessung und Grenzwertsetzung

Kurzfristig sind die Folgen, die im Zusammenhang mit Partikelzahlen oder Russ beschrieben worden sind, nicht viel anders als die Folgen anderer Luftschadstoffe. Sofern die Messmethoden standardisiert sind, wäre es möglich, aus der Literatur Expositions-Wirkungsfunktionen abzuleiten, aus denen das kurzfristige Risiko pro Einheit (z. B. für EC in Mikrogramm pro Kubikmeter) und für ein akzeptiertes Risikoniveau (Grenzwert) berechnet werden könnten. Allerdings werden mit den heutigen Kurzzeitgrenzwerten für PM₁₀ und NO₂ auch die täglichen Spitzenbelastungen durch Verkehrsabgase begrenzt. Zur Ableitung von Risikofunktionen für noch kürzere Spitzenwerte (z. B. Stunden) von ultrafeinen oder kohlenstoffhaltigen Partikeln, die nicht unbedingt mit den NO₂-Werten parallel gehen, fehlen die epidemiologischen Grundlagen.

Aus gesundheitlicher Sicht ist vor allem die langfristige Belastung mit Partikeln im Grössenbereich unter einem Mikrometer oder primären Verbrennungspartikeln wichtig. Die längere Verweildauer in den Lungen und das Potenzial, in den Kreislauf einzudringen, bergen das Risiko, dass sie stärkere oder andere Folgen haben können als grössere Feinstaubfraktionen und auch als NO₂. Ob dies der Fall ist, und ob die speziell in der Nähe von verkehrsreichen Strassen beobachteten Risiken für Asthma und Herz-/Kreislaufkrankheiten wirklich nur den feinsten Partikeln, einer anderen damit korrelierten Substanz oder einer Kombination von Gasen und Partikeln im Verbrennungsaerosol zuzuschreiben sind, ist noch nicht gesichert. Unklar ist ebenfalls noch, ob diese Risiken unspezifisch auf alle Partikel in diesem Grössenbereich unter 1 µm zurückzuführen wären und in welchem Ausmass die chemische Zusammensetzung eine Rolle spielt. Es gibt, wie erwähnt, auch Hinweise, dass es nicht die Partikel an sich sind, sondern ihre Rolle als Träger für andere Substanzen.

Ein räumlich variableres Mass als PM₁₀ wäre zur Charakterisierung der Belastung mit primären Verbrennungspartikeln für Bevölkerungsstudien wichtig. Dies würde allerdings ein relativ engmaschiges Netz von Messungen und kleinräumige Belastungsmodellierungen voraussetzen. Vorläufig sind die wissenschaftlichen Grundlagen spärlich. Keine der europäischen Langzeitstudien hat EC als Kenngrösse für Russ gemessen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die mit anderen Russindikatoren wie BC oder BS beobachteten Gesundheitsfolgen auch mit der Messgrösse EC zunehmen.

A3 Immissionen und Messverfahren

A3-1 Beziehung zwischen PM10 und PM2.5 in der Aussenluft

In der Schweiz sind die Feinstaubimmissionen durch je einen Lang- und Kurzzeitgrenzwert für PM10 limitiert. Auf separate Grenzwerte für PM2.5, wie sie die EU und die USA kennen, wurde verzichtet. Trotzdem werden im NABEL-Messnetz an ausgewählten Standorten bereits seit vielen Jahren neben PM10 auch PM2.5 gemessen. Diese Messungen zeigen, dass zwischen PM10 und PM2.5 ein sehr enger Zusammenhang besteht. Tab. 4 gibt einen Überblick über die Messstationen des NABEL, an denen neben PM10 zusätzlich PM2.5 sowie weitere Partikelparameter gemessen werden. Die Standorte wurden so gewählt, dass alle für eine breite Bevölkerung wichtigen Expositionstypen repräsentiert sind.

Tab. 4 > Charakterisierung der NABEL-Stationen

wo zusätzliche Partikelmessungen durchgeführt werden.

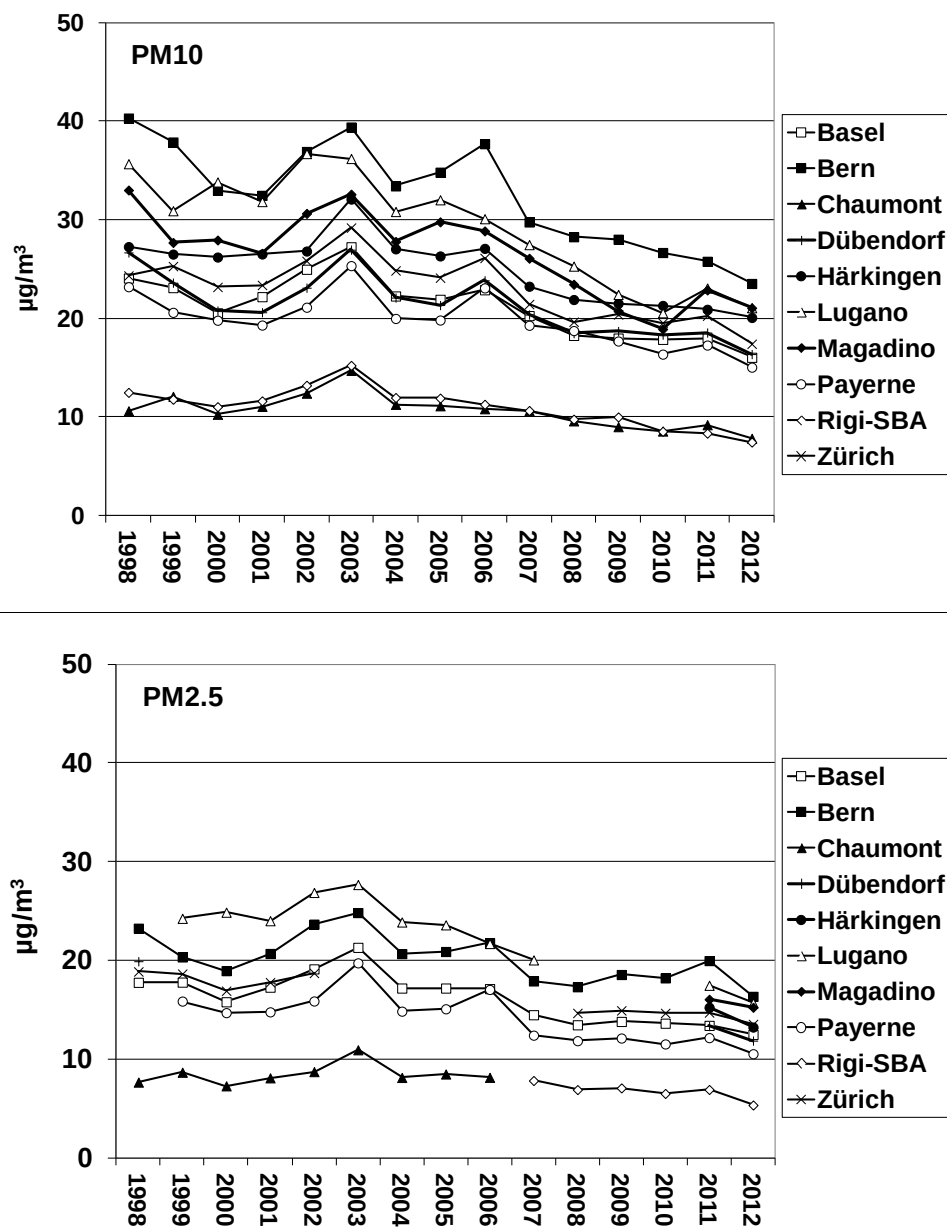
Basel	vorstädtisch, am Stadtrand auf dem Gebiet der Gemeinde Binningen
Bern	städtisch, direkt an Hauptverkehrsachse, ca. 3 m vom Strassenrand in Strassenschlucht
Chaumont	ländlich, oberhalb 1000 m
Dübendorf	vorstädtisch, ca. 150 m von Hauptverkehrsstrasse
Härkingen	ca. 20 m nördlich der Autobahn A1
Lugano	städtisch, in relativ offener Hofsituation; Alpensüdseite
Magadino	ländlich, unterhalb 1000 m; Alpensüdseite
Payerne	ländlich, unterhalb 1000 m
Rigi-Seebodenalp	ländlich, oberhalb 1000 m
Zürich	städtisch, Hofsituation, nicht unmittelbar verkehrsbelastet

Abb. 6 zeigt den langjährigen Verlauf der PM10- und PM2.5-Konzentrationen. Sowohl PM10 wie auch PM2.5 weisen einen generell abnehmenden Trend der Konzentrationen auf. Abb. 7 gibt einen Überblick über die langjährigen Verläufe der mittleren PM2.5/PM10-Verhältnisse der Tageswerte. Sie illustriert die relativ geringe Bandbreite der Schwankungen dieser Verhältnisse von Station zu Station. Eine Ausnahme bildete bis vor kurzem die Strassenschlucht in Bern mit deutlich höherem Anteil größerer Partikel und entsprechend tieferen Verhältnissen. Allerdings hat sich dieser Unterschied im Laufe der letzten Jahre deutlich verringert. Seit 2010 liegt das PM2.5/PM10-Verhältnis auch in Bern etwa im Bereich der anderen NABEL-Stationen. Dies könnte mit der Erneuerung des Strassenbelags im Bereich dieser Station im Zusammenhang stehen. Allerdings ist wegen zahlreicher Änderungen weiterer möglicher Einflussgrößen (Spuren, Verkehrsführung, zeitweise Sperrungen, Gebäuderenovationen etc.) eine eindeutige Begründung nicht möglich. Der Fall Bern zeigt aber eindrücklich, dass ein für eine Station einmal bestimmtes PM2.5/PM10-Verhältnis keinesfalls ohne periodische Überprüfung längerfristig als gegeben angenommen werden darf. Ein ebenfalls etwas abweichendes Verhalten wird in Payerne beobachtet. Hier hat sich das bis 2006 stets zwischen 0.71 und 0.78 liegende PM2.5/PM10-Verhältnis der Tageswerte in den Jahren 2007 und 2008 auf etwa 0.6 deutlich verringert. Von 2009 bis 2012 hat sich das Verhältnis wieder auf nun rund 0.65 erhöht. Eine Detailanalyse zeigt, dass vor allem die PM2.5/PM10-Verhältnisse im Sommer tiefer sind als früher, was auf erhöhte Emissionen von größerem mineralischem Staub hinweist (z.B. landwirtschaftliche Bodenbearbeitung, Baustaub etc.). Alle untersuchten Stationen zeigen im langjährigen durchschnittlichen Jahresverlauf der PM2.5/PM10-Verhältnisse höhere Werte im Winter, wenn auch unterschiedlich ausgeprägt (Abb. 8). Abb. 9 zeigt am Beispiel der Stationen Basel (Stadtrand), Bern (Strassenschlucht) und Payerne (ländlich), dass die

Korrelation der Tageswerte von PM_{2.5} und PM₁₀ über die gesamte Messzeit (seit 1998) durchwegs sehr hoch war.

Aus Tab. 5 wird ersichtlich, dass die Tageswerte von PM₁₀ und PM_{2.5} an allen Stationen sehr hoch korreliert sind. Dadurch sind recht gute Abschätzungen für PM_{2.5}-Konzentrationen aus PM₁₀-Daten möglich, zumindest für Jahresmittelwerte. Allerdings sind für eine sichere Quantifizierung von PM_{2.5} zumindest von Zeit zu Zeit gleichzeitige Stichprobenmessungen von PM₁₀ und PM_{2.5} nötig, um durchaus mögliche Veränderungen des PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisses im Laufe der Zeit erkennen zu können (z. B. Bern).

Abb. 6 > Langjährige Verläufe der Jahresmittelwerte von PM₁₀ und PM_{2.5}



Quelle: NABEL-Messnetz BAFU/Empa (Gehrig 2013a)

Tab. 5 > Korrelationskoeffizienten (r) von PM2.5 mit PM10 sowie Verhältnis PM2.5/PM10

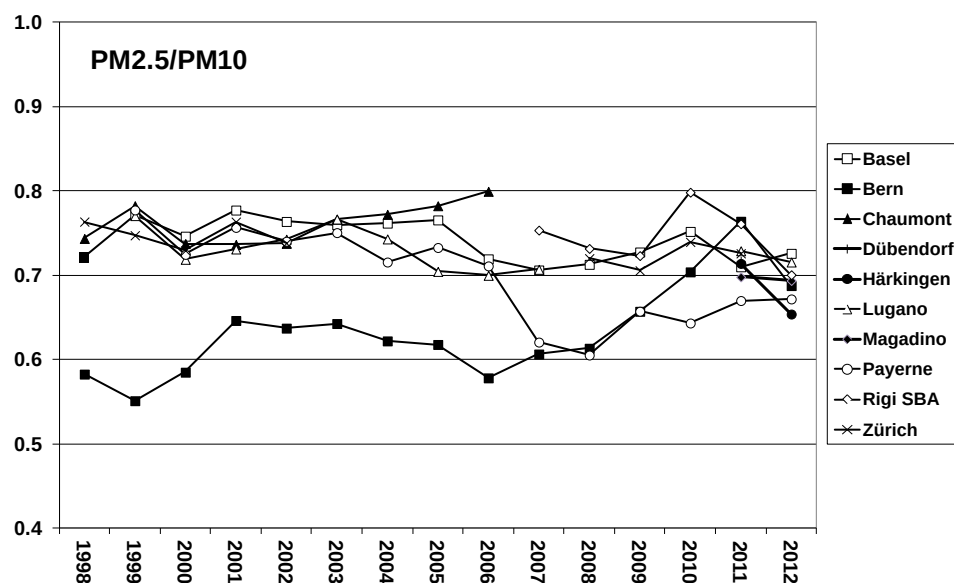
an ausgewählten NABEL-Stationen von 1998–2011 auf der Basis von Tageswerten.

	r	PM2.5/PM10
Basel	0,97	0,74
Bern	0,93	0,63
Chaumont	0,91	0,76
Dübendorf	0,98	0,71
Härkingen	0,90	0,68
Lugano	0,96	0,73
Magadino	0,98	0,70
Payerne	0,96	0,70
Rigi Seebodenalp	0,90	0,75
Zürich	0,96	0,74
Mittelwert	0,95	0,71

Chaumont nur 1998–2006, Rigi-Seebodenalp nur 2007–2012, Dübendorf und Härkingen nur 2011–2012

Abb. 7 > Langjähriger Verlauf der mittleren PM2.5/PM10-Verhältnisse

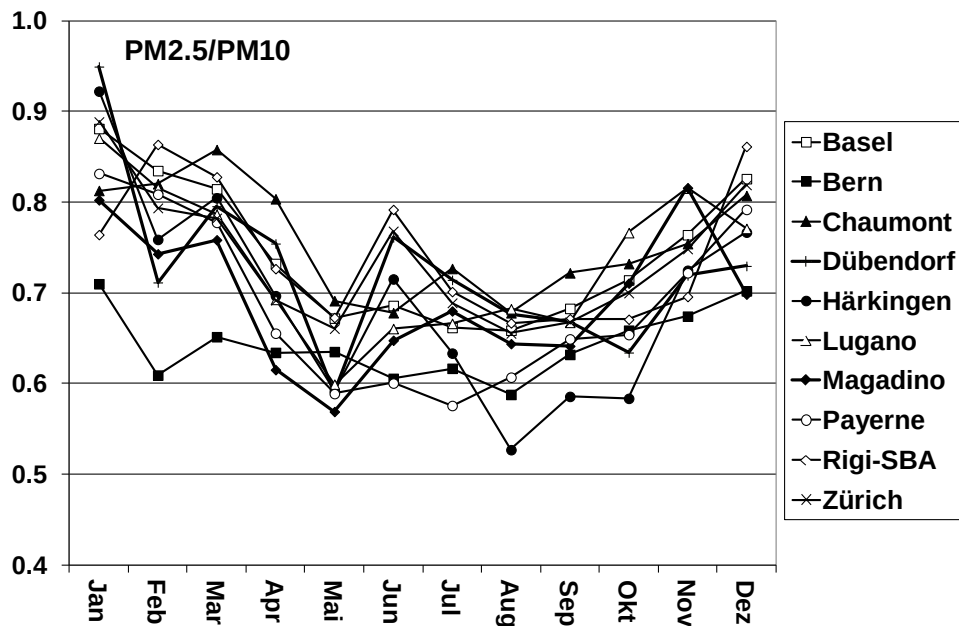
auf der Basis von Tageswerten.



Quelle: NABEL-Messnetz BAFU/Empa (Gehrig 2013a)

Abb. 8 > Durchschnittlicher Jahresverlauf der PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisse

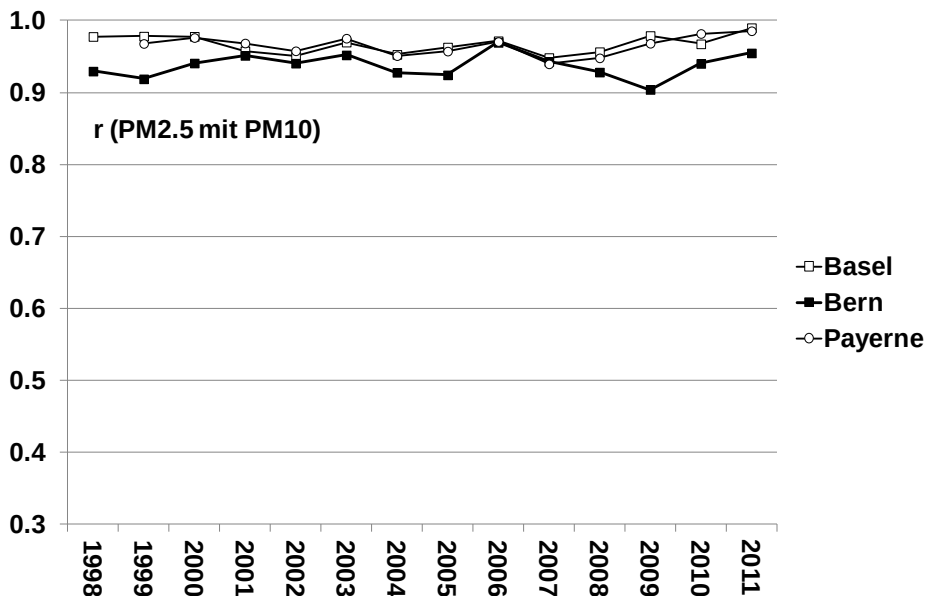
Monatsmittelwerte



Quelle: NABEL-Messnetz BAFU/Empa (Gehrig 2013a)

Abb. 9 > Langjähriger Verlauf der Korrelationskoeffizienten von PM_{2.5} mit PM₁₀

(auf der Basis von Tageswerten) an ausgewählten NABEL-Stationen.



Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Aus der Analyse der Korrelationen der Tageswerte von PM₁₀ zwischen verschiedenen Stationen können interessante Informationen über die räumliche Variabilität von PM₁₀ erhalten werden (Tab. 6). So weisen alle Stationen des schweizerischen Mittellandes, die nicht deutlich erhöht gelegen sind, eine erstaunlich hohe Korrelation auf (grau unterlegte Tabellenzellen). Dies zeigt klar, dass die Variabilität der Feinstaubkonzentrationen vor allem durch die meteorologisch bedingte Verdünnung der Emissionen aus

den allgegenwärtigen Quellen (Verkehr, (Holz-) Heizungen etc.) sowie die grossräumige Bildung von sekundären Aerosolen bestimmt wird und weniger durch spezifische lokale Emissionen. Deutlich geringer sind erwartungsgemäss die Korrelationen zwischen Stationen mit stark unterschiedlichen Meteeinflüssen, sei es, weil sie auf unterschiedlichen Seiten der Alpen liegen, oder wegen grosser Höhendifferenzen unterschiedlich durch Inversionslagen beeinflusst werden. Erwartungsgemäss sind hingegen die beiden erhöht gelegenen Stationen Chaumont und Rigi Seebodenalp wieder hoch korreliert.

Tab. 6 > Korrelationskoeffizienten r der Tageswerte von PM10

zwischen verschiedenen NABEL-Stationen.

	Basel	Bern	Chaumont	Härkingen	Lugano	Payerne	Rigi
Bern	0,83						
Chaumont	0,51	0,43					
Härkingen	0,89	0,87	0,46				
Lugano	0,43	0,49	0,26	0,48			
Payerne	0,88	0,87	0,56	0,90	0,47		
Rigi SBA	0,48	0,43	0,84	0,42	0,28	0,54	
Zürich	0,91	0,84	0,50	0,91	0,44	0,89	0,49

1998–2011

Zur Veranschaulichung der räumlichen Verteilung von PM10 und PM2.5 zeigen Abb. 10 und Abb. 11 Karten mit Modellresultaten für das Jahr 2010.

Abb. 10 PM10-Konzentrationen im Jahr 2010

Modellauflösung 200 m x 200 m

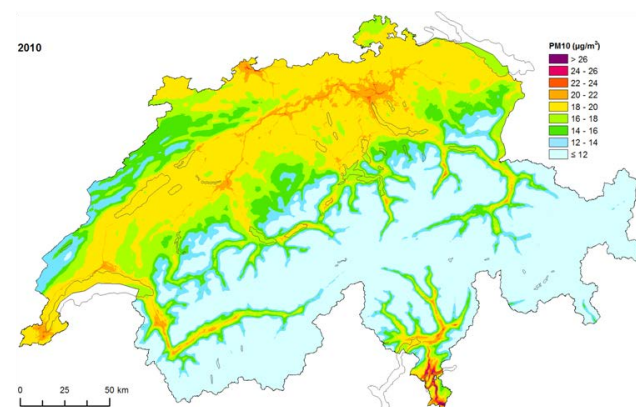
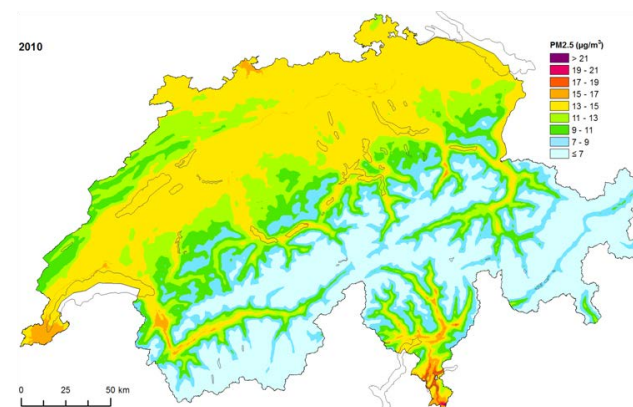


Abb. 11 PM2.5-Konzentrationen im Jahr 2010

Modellauflösung 200 m x 200 m



Quelle: BAFU 2013

A3-2 Stand der Messtechnologie und Regulierung neuer Schadstoffe

Immissionsseitig sind in der Schweiz Grenzwerte für die Massenkonzentration von PM10 (Langzeit- und Kurzzeitgrenzwert) sowie für die Konzentrationen von Blei und Cadmium im PM10 festgelegt. Vor dem Hintergrund von Bedenken, ob diese Grenzwerte genügen, stellt sich die Frage, ob allenfalls zusätzliche Parameter wie z. B. Anzahlkonzentrationen der Partikel, Oberflächenkonzentrationen oder bestimmte Inhaltsstoffe des Feinstaubes (z. B. weitere Schwermetalle, Russ, polyzyklische Aromaten, Oxidationspotential) zu messen oder gar durch zusätzliche Grenzwerte zu limitieren wären.

Unverzichtbare Voraussetzung für den Einbezug neuer Parameter in die Messprogramme vollzugsorientierter Messnetze ist allerdings die Verfügbarkeit praktikabler und international harmonisierter Messverfahren. Insbesondere müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Messdaten müssen international vergleichbar sein.
- Das Messverfahren muss entweder mit einem international akzeptierten und zertifizierten Standard kalibrierbar sein (Traceability) oder äquivalent zu einem definierten Referenzverfahren sein (z. B. Gravimetrie für PM10 und PM2.5).
- Das Messverfahren muss für Routinemessungen in einem Messnetz praktikabel sein. Dazu gehören z. B. unterhaltsfreie, stabile Messungen während mindestens 2 Wochen (übliches Wartungsintervall der Stationen).
- Genügende zeitliche Auflösung.

Es gibt gute Gründe, um zusätzlich zu PM10 auch ultrafeine Partikel zu messen, da diese wegen ihrer sehr geringen Masse durch Massenkonzentrationsmessungen nicht adäquat erfasst werden können. Dies gilt insbesondere auch für frische Verbrennungspartikel, die vorwiegend in der ultrafeinen Fraktion auftreten. Ein guter Indikator für die ultrafeinen Partikel ist die Anzahlkonzentration, die vorwiegend durch die Teilchen <100 nm dominiert wird. Dies kann sehr gut an Messungen der Partikelgrössenverteilungen bei der NABEL-Station Härkingen gezeigt werden (Tab. 7 und Abb. 12). Wegen ihrer Lage direkt am Rande der Autobahn A1 repräsentieren diese Messungen je nach Windrichtung einen starken Verkehrseinfluss (Verkehr) oder etwa durchschnittliche ländliche Mittellandbedingungen (Hintergrund).

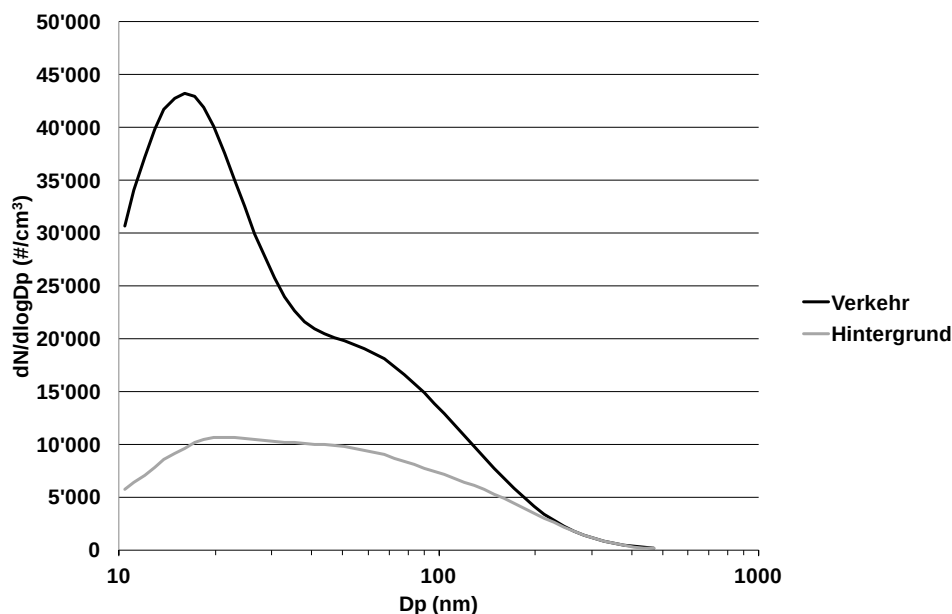
Tab. 7 > Anzahlkonzentrationen von Partikeln grösser resp. kleiner als 100 nm

(Messbereich: 10–500 nm) an der NABEL-Station Härkingen für Windsituationen mit direktem Einfluss der Autobahn A1 (Verkehr) sowie ohne direkten Verkehrseinfluss (Hintergrund).

		Verkehr		Hintergrund	
		Winter	Sommer	Winter	Sommer
10–100 nm	#/cm ³	37 929	17 855	10 250	8 622
100–500 nm	#/cm ³	3 401	1 957	2 530	1 315
10–500 nm	#/cm ³	41 331	19 812	12 779	9 936
Anteil <100 nm		92 %	90 %	80 %	87 %

Abb. 12 > Durchschnittliche Anzahlgrößenverteilungen

an der NABEL-Station Härkingen für Windsituationen mit und ohne Verkehrseinfluss (Dp Partikeldurchmesser) dN/dlogDp
Anzahl Partikel in einem logarithmischen Größenintervall.



Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Zusätzliche Messungen solcher Größen wie Anzahlkonzentrationen, Russ etc. würden es oft besser als PM10-Messungen erlauben, die Auswirkungen bestimmter Massnahmen zur Emissionsminderung (Dieselpartikelfilter, Änderungen von Verkehrsregimes) zu erfassen und zu überwachen.

Geräte zur Messung der Anzahl- oder der Oberflächenkonzentrationen von Partikeln mit hoher Zeitauflösung sind heute verfügbar. Allerdings existieren weder standardisierte Referenzmaterialien für die Kalibration, noch ein Referenzverfahren. Eine Arbeitsgruppe des CEN (Europäisches Komitee für Normung) ist gegenwärtig dabei, eine Norm zur international harmonisierten Messung von Anzahl und Größenverteilung von Partikeln zu erarbeiten. Allerdings wird es bis zum Vorliegen einer Norm noch einige Jahre dauern.

Ähnliches gilt für Messverfahren für kohlenstoffhaltige Partikel. Dazu gehören thermo-optische Verfahren für elementaren Kohlenstoff (EC), organisch gebundenen Kohlenstoff (OC) und totalen Kohlenstoff (TC = EC+OC) sowie optische Verfahren zur Messung von Russ (BC = black carbon oder BS = black smoke). Hier sind die Arbeiten des CEN zur Standardisierung bereits relativ weit fortgeschritten. Das Referenzverfahren wird voraussichtlich ein thermo-optisches Verfahren zur getrennten Bestimmung von EC und OC sein, basierend auf einer stufenweisen kontrollierten Verbrennung der auf Filtern deponierten kohlenstoffhaltigen Partikel nach einem festgelegten Temperaturprogramm mit optischer Korrektur der Verkokungsartefakte. Zusätzlich sollen Leitlinien zur Anbindung optischer Verfahren (z. B. Aethalometer) zur BC-Bestimmung an die EC-Messung des Referenzverfahrens erarbeitet werden. Ein validiertes Referenzverfahren kann in etwa 1–2 Jahren erwartet werden.

Zur Messung toxischer Inhaltsstoffe des Feinstaubs (Metalle, polyzyklische Aromaten) existieren bereits standardisierte Normverfahren und es sind auch Referenzmaterialien zur Kalibrierung erhältlich. Allerdings erfordern diese Verfahren eine recht aufwendige Laboranalytik von Filterproben mit entsprechend hohen Kosten. Begnügt man sich

aber mit einer geringen Zeitauflösung (z.B. Quartalsproben oder Jahreswerte) so können die entsprechenden Belastungen trotzdem mit vertretbarem Aufwand charakterisiert werden, insbesondere an Stationen, an denen ohnehin Filter aus gravimetrischen Feinstaubmessungen zur Verfügung stehen. Organische Partikel sowie wasserlösliche anorganische Ionen (z. B. Nitrat, Sulfat, Ammonium, Chlorid etc.) werden oft ebenfalls von Filterproben bestimmt.

Das Oxidationspotential der Partikel (Reactive Oxygen Species, ROS) wird verbreitet als ein interessanter Parameter zur Beurteilung des zellschädigenden Potentials von Feinstaub vorgeschlagen. Ein normiertes Referenzverfahren zu dessen Messung fehlt zurzeit noch.

Tab. 8 gibt einen Überblick über wichtige Partikelparameter und Referenzverfahren.

Tab. 8 > Übersicht über ausgewählte wichtige Partikelparameter und Referenzverfahren

Parameter	Referenzverfahren	Zeitauflösung
Massenkonzentration (PM ₁₀ , PM _{2.5})	Manuelles gravimetrisches Verfahren (EN 12341, EN 14907)	üblich sind Tageswerte
Anzahlkonzentration Grössenverteilung	Norm für Kondensationskernzähler, SMPS (Standard Mobility Particle Sizer) in Vorbereitung	hoch (Minuten)
Oberflächenkonzentration	Kein Referenzverfahren. Möglich ist z. B. Abschätzung aus Anzahl-Grössenverteilung.	hoch (Minuten)
Kohlenstoffhaltige Partikel (EC, OC, TC)	Norm für thermo-optisches Verfahren nach EUSAAR2-Protokoll in Vorbereitung (CEN/TR 16243:2011)	üblich sind Tageswerte
Russ (BC)	Aethalometer. Leitlinien zur Anbindung an EC-Messung nach EUSAAR2 in Vorbereitung	hoch (Minuten)
Polyzyklische Aromaten (PAH)	Analytik auf Filtern (EN 15549), aus Kostengründen werden meist nur über längere Zeit aggregierte Proben analysiert.	niedrig, Monats- oder Jahreswerte
Metalle	Analytik auf Filtern (EN 14902), aus Kostengründen werden meist nur über längere Zeit aggregierte Proben analysiert.	niedrig, Monats- oder Jahreswerte
Oxidationspotential der Partikel (ROS)	Keines	--

A3-3 Zusammenhang zwischen regulierten Schadstoffen und den Kandidaten neuer Regulierungen

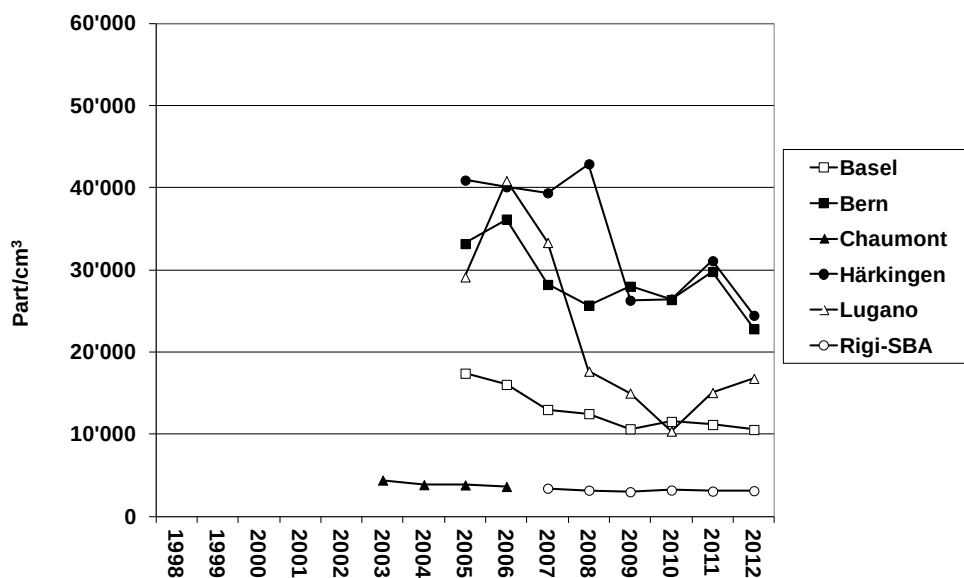
Wie in Anhang A3-2 bereits erläutert, ist die Messung zusätzlicher Partikelparameter neben den Massenkonzentrationen von PM₁₀ und PM_{2.5} von grossem Interesse. Die mögliche Bedeutung von Messgrössen wie Partikelanzahlkonzentrationen, kohlenstoffhaltigen Partikeln, Metallen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen wurde im NABEL bereits vor Jahren erkannt und entsprechende Messungen wurden an einer Auswahl von Stationen ins Messprogramm aufgenommen. Da zur Partikelanzahlkonzentration vorwiegend die zahlenmässig dominierenden ultrafeinen Partikel (<100 nm) beitragen (siehe Tab. 7 und Abb. 12) stellt dieser Parameter einen sehr guten Indikator für diese feinsten Partikel dar, deren Bedeutung wegen ihrer verschwindend geringen Masse bei den PM-Messungen nicht adäquat zum Ausdruck kommt. Kohlenstoffhaltige Partikel, Metalle und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe sind wichtige, potentiell toxische Inhaltstoffe des Feinstaubes (typischerweise im Grössenbereich von <100 nm bis etwa 1 µm).

Abb. 13 bis Abb. 21 geben einen Überblick über bisher im NABEL gemessene Konzentrationen ausgewählter zusätzlicher Partikelparameter. Für die Schwermetalle Blei und Cadmium (Abb. 18 und Abb. 19) sowie für elementaren Kohlenstoff (Abb. 16, hier allerdings nicht durchgehende und aus verschiedenen Messmethoden homogenisierte Daten) stehen bereits sehr lange Messreihen zur Verfügung, die an allen untersuchten Stationen eine starke Abnahme der Belastungen zeigen. Für Partikelanzahlkonzentrationen (Abb. 13), Benzo(a)pyren (als wichtigstem Vertreter der polyzyklischen aromatischen Verbindungen, Abb. 17) sowie die Metalle Nickel und Arsen (Abb. 20 und Abb. 21) sind die Datenreihen leider kürzer und erlauben noch keine sicheren Trendaussagen. Tendenziell scheinen aber auch diese Parameter eher abzunehmen. Interessant ist, dass für das krebserregende Benzo(a)pyren offensichtlich nicht der Verkehr, sondern Holzfeuerungen die Hauptquelle darstellen. Dies geht klar aus den erhöhten Werten an der NABEL-Station Magadino sowie an den kantonalen Stationen San Vittore und Ebnat-Kappel hervor. Auch erste Resultate kantonaler Messungen in Appenzell weisen darauf hin.

Aus Abb. 14 sind zudem die seit 2003 gemessenen gravimetrischen PM₁-Konzentrationen ersichtlich, die etwa parallel zu PM_{2.5} und PM₁₀ leicht abnehmen. Abb. 15 zeigt, dass mit Ausnahme der erhöht gelegenen Standorte Chaumont und Rigi-Seebodenalp PM₁ typischerweise 50–60 % von PM₁₀ ausmacht.

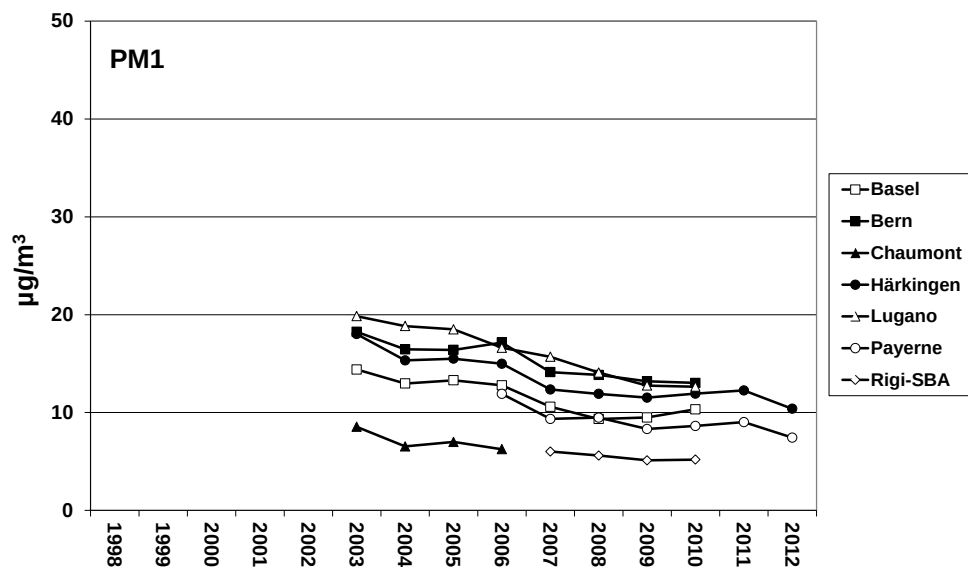
Zum Vergleich zeigt Abb. 22 den langjährigen Verlauf der NO₂-Konzentrationen, welche seit 1998 an den meisten Standorten nur leicht abgenommen haben.

Abb. 13 > Langjähriger Verlauf der Partikelanzahlkonzentrationen



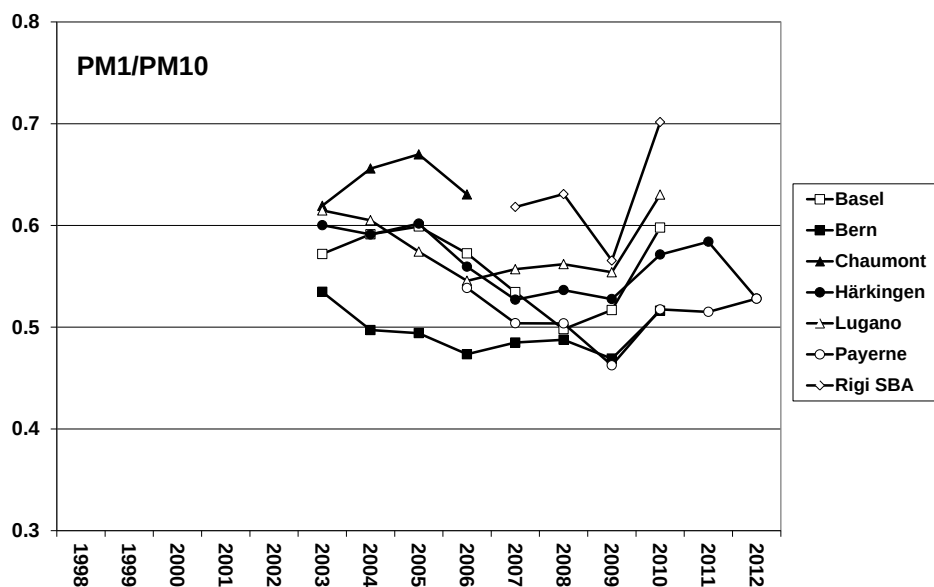
Quelle: NABEL-Messnetz BAFU/Empa (Gehrig 2013a)

Abb. 14 > Langjähriger Verlauf der Konzentrationen von PM1



Quelle: NABEL-Messnetz BAFU/Empa (Gehrig 2013a)

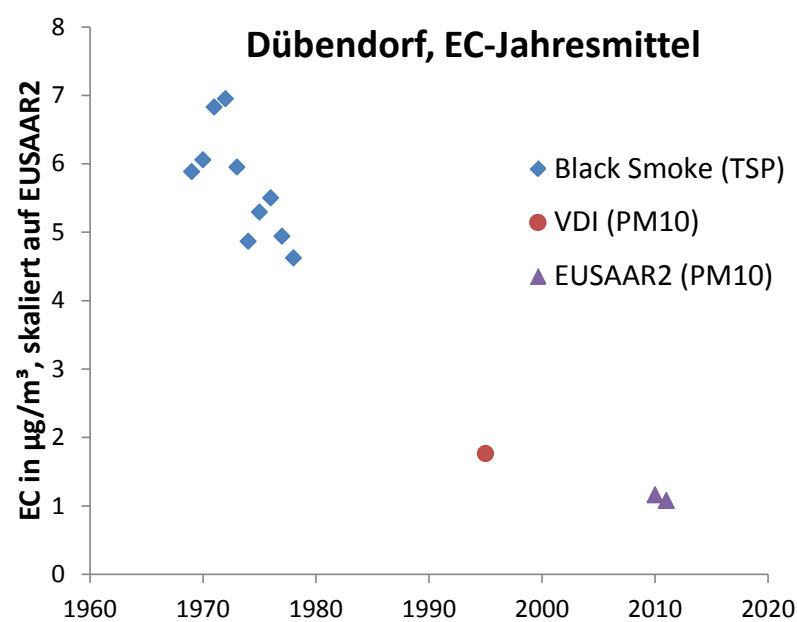
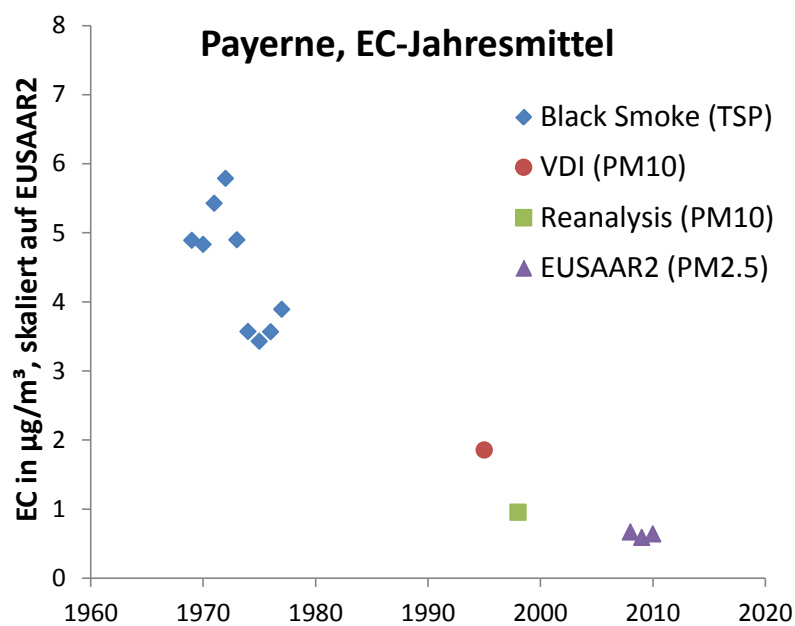
Abb. 15 > Langjähriger Verlauf der PM1/PM10-Verhältnisse der Tageswerte



Quelle: NABEL-Messnetz BAFU/Empa (Gehrig 2013a)

Abb. 16 > Konzentrationen von elementarem Kohlenstoff (EC)

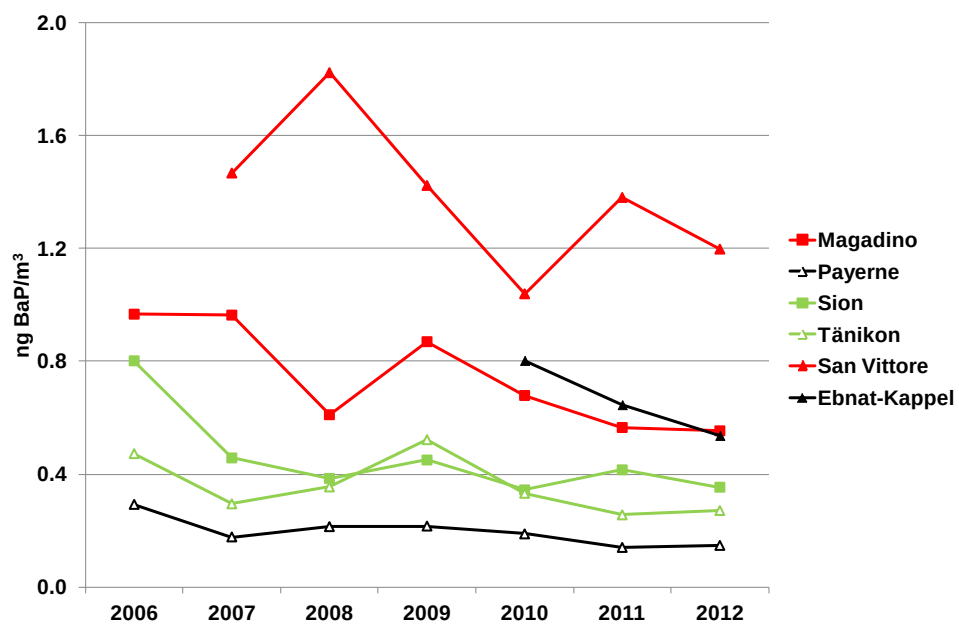
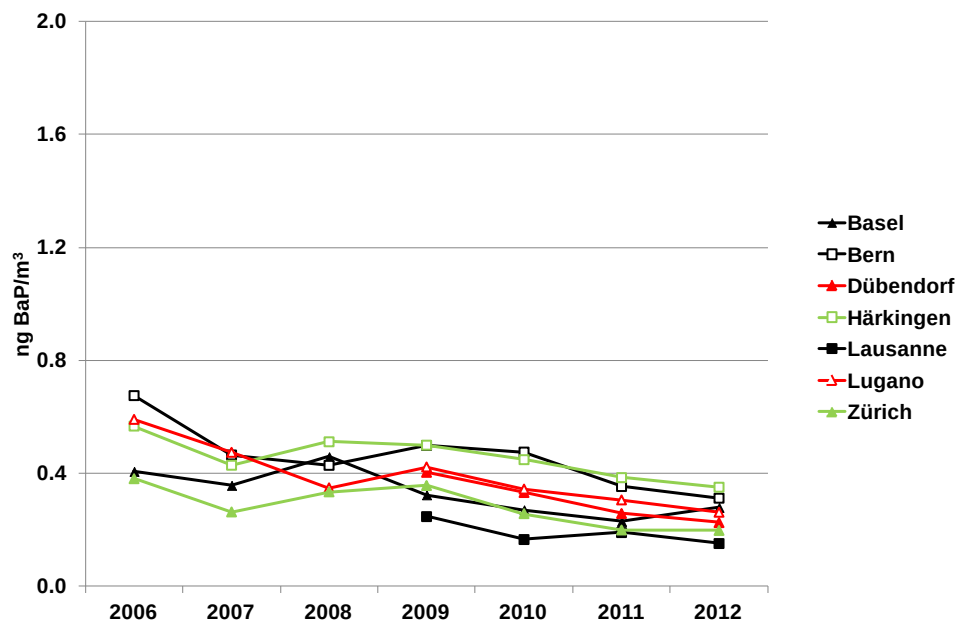
in Payerne und Dübendorf seit den späten 60er-Jahren. Die Messungen erfolgten mit unterschiedlichen Verfahren und wurden alle auf das heute aktuelle EUSAAR2-Verfahren korrigiert.



R. Weber, BAFU; Korrekturen nach Quincey 2011

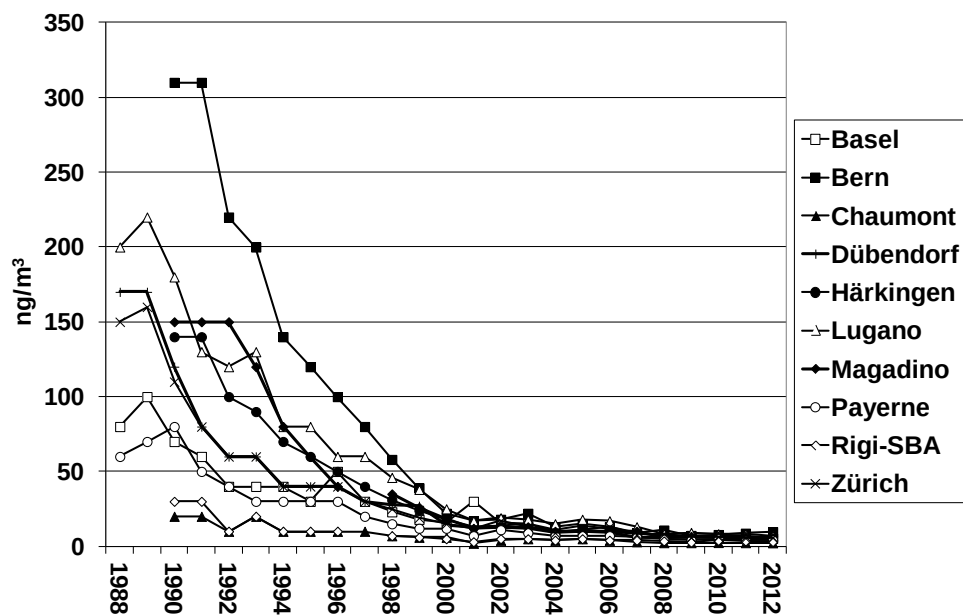
Abb. 17 > Jahresmittelwerte der Konzentrationen von Benzo(a)pyren im PM10

Oben städtische, vorstädtische Stationen und Verkehrsstandorte, unten ländliche Standorte (Ebnet-Kappel nur Juli 2010–Juni 2012).



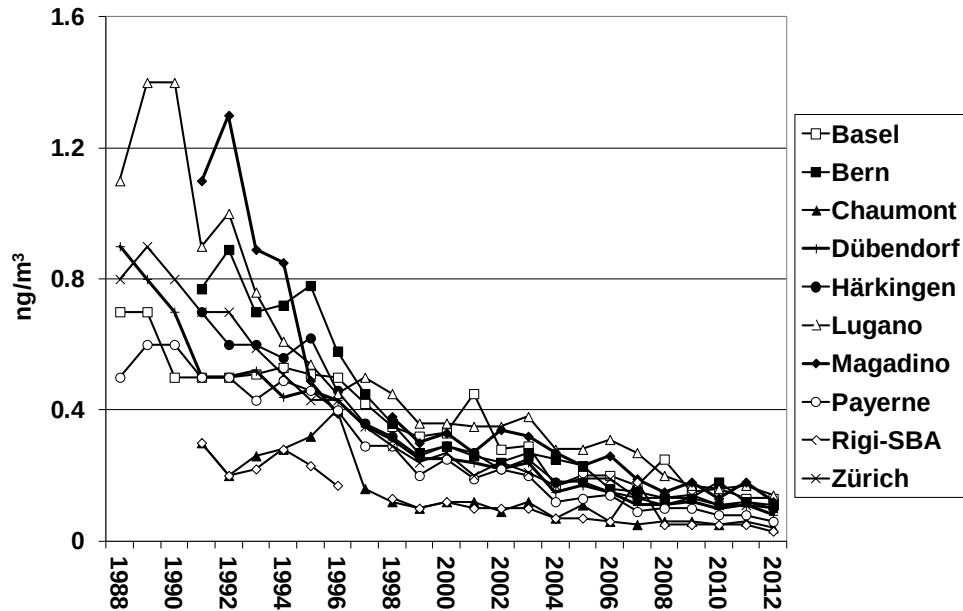
Quelle: NABEL-Messnetz BAFU/Empa (Gehrig 2013 b)

Abb. 18 > Blei im PM10



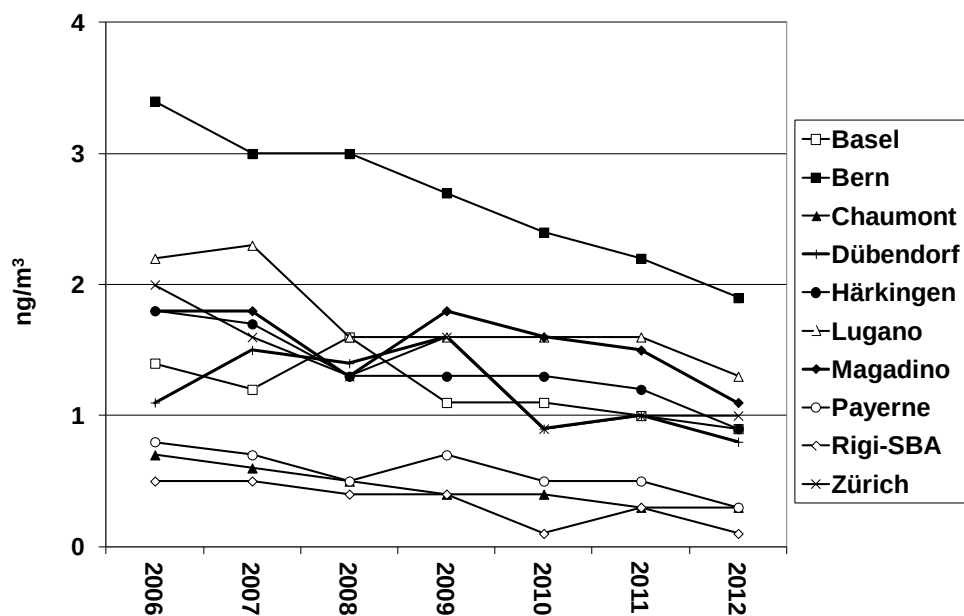
bis 1997 im TSP; Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Abb. 19 > Cadmium im PM10



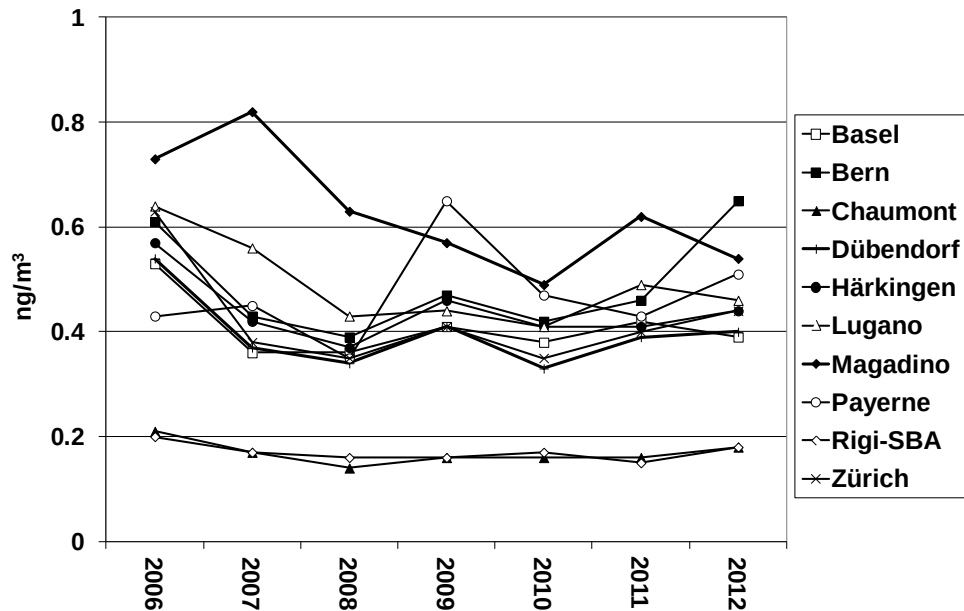
bis 1997 im TSP; Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Abb. 20 > Nickel im PM10



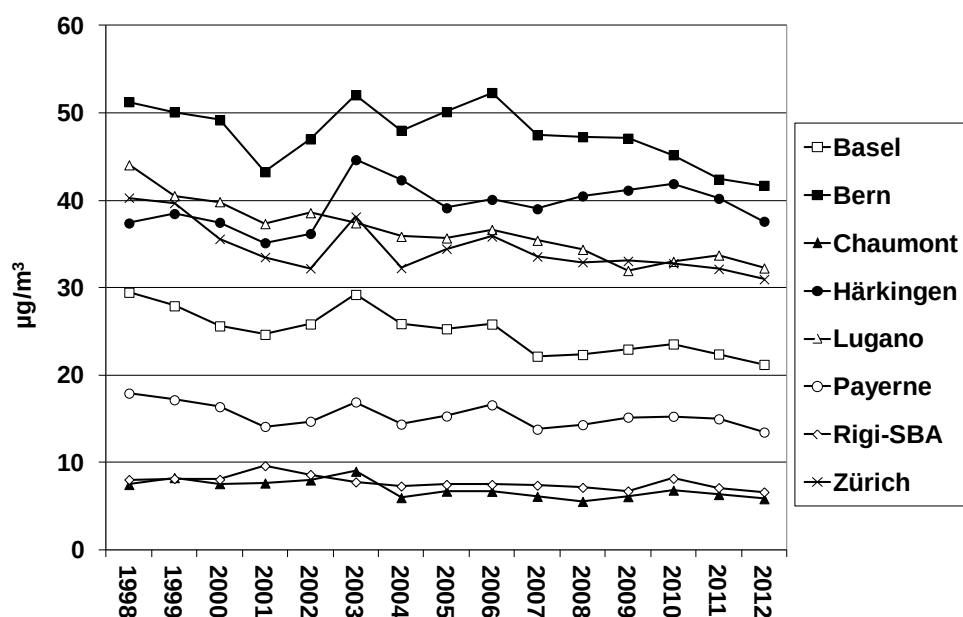
Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Abb. 21 > Arsen im PM10



Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Abb. 22 > Langjähriger Verlauf der Konzentrationen von Stickstoffdioxid



Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Die Messung dieser zusätzlichen Partikelparameter erfordert einen erheblichen analytischen Aufwand und ist deshalb teuer. Daher interessiert neben der absoluten Höhe der Konzentrationen insbesondere auch, ob hier analog wie zwischen PM_{2.5} und PM₁₀ ausgeprägte Korrelationen bestehen, die es allenfalls erlauben würden, aufwendige Messungen durch Abschätzungen aus anderen Parametern zu ersetzen.

Tab. 9 > Korrelationskoeffizienten (r) der Tageswerte ausgewählter Paare von Partikelparametern an ausgewählten NABEL-Stationen

	PM ₁₀ PM _{2.5}	PM ₁₀ Anzahl	PM _{2.5} Anzahl	PM ₁₀ EC	PM _{2.5} EC	PM ₁₀ NO ₂	PM _{2.5} NO ₂
Basel	0,97	0,56	0,58	0,85	0,86	0,77	0,79
Bern	0,93	0,48	0,45	0,65	0,65	0,56	0,52
Chaumont	0,91	0,44	0,42			0,54	0,64
Härkingen		0,37		0,69		0,51	
Lugano	0,96	0,36	0,29	0,84	0,87	0,68	0,73
Payerne	0,96			0,80	0,80	0,75	0,78
Rigi	0,90	0,37	0,31			0,51	0,67
Zürich	0,96			0,76	0,66	0,76	0,69
Mittelwert	0,94	0,43	0,41	0,76	0,77	0,64	0,69

	Anzahl EC	NO ₂ EC	NO ₂ Anzahl
Basel	0,57	0,88	0,68
Bern	0,53	0,66	0,74
Chaumont			0,20
Härkingen	0,69	0,73	0,68
Lugano	0,65	0,88	0,58
Payerne		0,79	
Rigi			0,04
Zürich			
Mittelwert	0,61	0,79	0,49

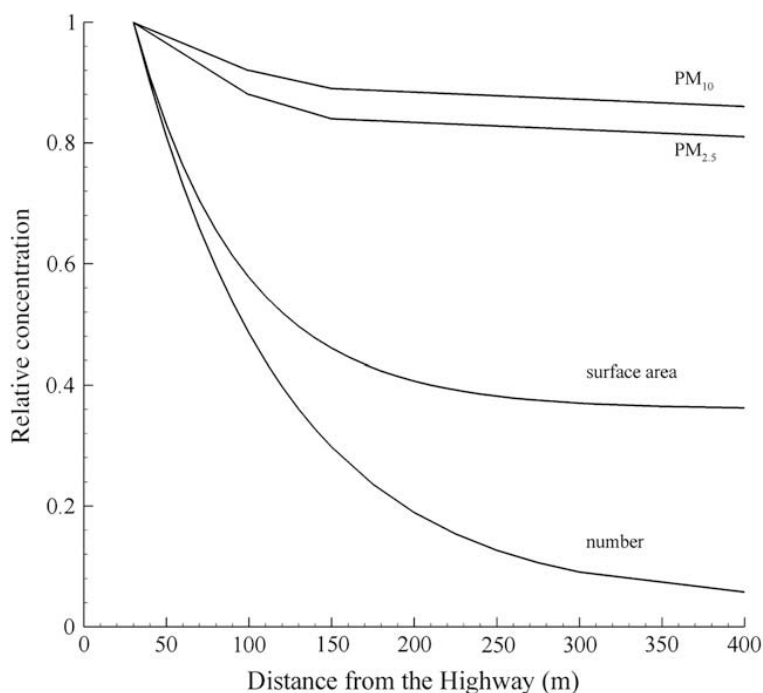
Tab. 9 zeigt allerdings, dass mit Ausnahme des bereits in Anhang A3-1 ausführlich diskutierten Parameterpaares PM_{2.5} und PM₁₀ solche Korrelationen nicht in genügendem Ausmass vorliegen, um einigermaßen zuverlässig von einer Messgrösse auf eine andere schliessen zu können. Zwar sind (weitgehend meteorologisch bedingt) durchwegs positive Korrelationen zu beobachten, die aber in keinem Fall für genügend präzise quantitative Abschätzungen ausreichen. Dies gilt auch für NO₂, welches ab und zu als Indikator für Partikel aus Verbrennungsprozessen vorgeschlagen wird. Zwar sind die Korrelationen von NO₂ mit EC an allen Stationen deutlich höher als mit PM₁₀ und PM_{2.5}. Für eine zuverlässige Abschätzung von Russ aus NO₂-Messungen reicht dies aber nicht aus. Die relativ schlechte Korrelation von PM₁₀ und PM_{2.5} mit der Partikelanzahlkonzentration zeigt zudem klar, dass insbesondere zwischen Massenkonzentrationen und der Belastung mit ultrafeinen Partikeln kein genügend guter Zusammenhang besteht, um auf eine dieser Messungen verzichten zu können.

Die im Rahmen des ESCAPE-Projekts an 20 europäischen Messstationen gefundenen Korrelationen zwischen PM_{2.5}, PM₁₀, EC (im ESCAPE-Projekt als PM_{2.5} absorbance gemessen) und NO₂ sind sehr ähnlich und bestätigen die Befunde aus der Schweiz (Eeftens 2012).

Abb. 23 und Abb. 24 illustrieren die sehr unterschiedliche räumliche Verteilung der Anzahl Partikel (dominiert von den ultrafeinen Partikeln) und Massenkonzentrationen an zwei Beispielen von stark befahrenen Strassen. Während die kurzlebigen, lokal emittierten ultrafeinen Auspuffpartikel mit zunehmendem Abstand zur Strasse rasch abnehmen, sind die langlebigen, aus zahlreichen verschiedenen – nicht nur lokalen – Quellen stammenden, massenrelevanten grösseren Partikel räumlich homogener verteilt.

Abb. 23 > Relative Abnahme der Massenkonzentrationen (PM₁₀ und PM_{2.5})

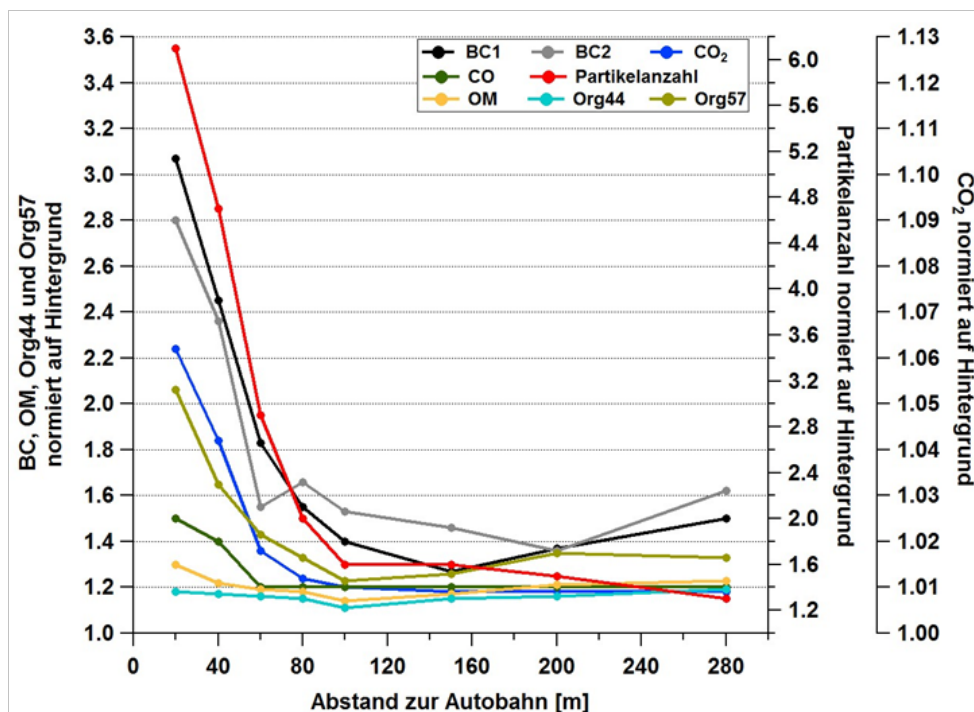
sowie der Oberflächen- und Anzahlkonzentrationen mit zunehmendem Abstand von einer Strasse.



Quelle: Buonanno 2009

Abb. 24 > Relative Abnahme der Konzentrationen mit dem Strassenabstand

BC (mit zwei verschiedenen Methoden gemessen) und partikuläres organisches Material (OM), zwei Marker im organischen Aerosol (Org 57 für primäres organisches Aerosol, Org44 für sekundäres organisches Aerosol), Partikelanzahl sowie Gase Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂). Alle Werte sind normiert auf die Hintergrundkonzentration.

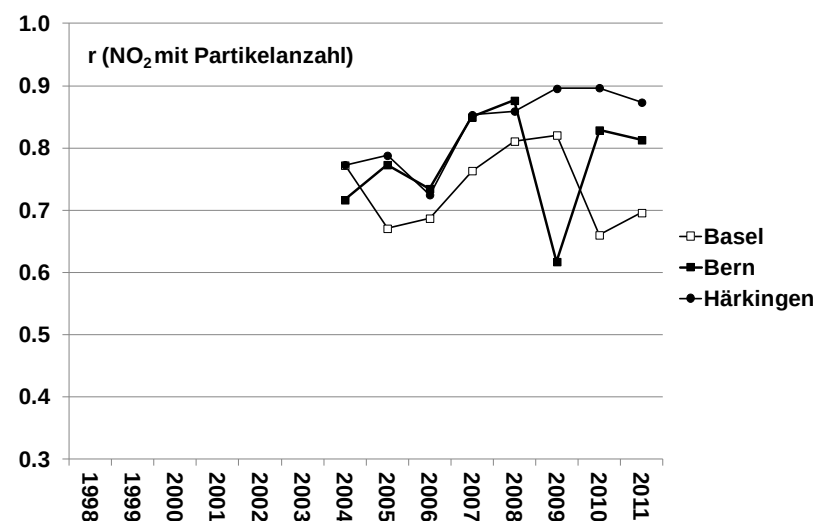
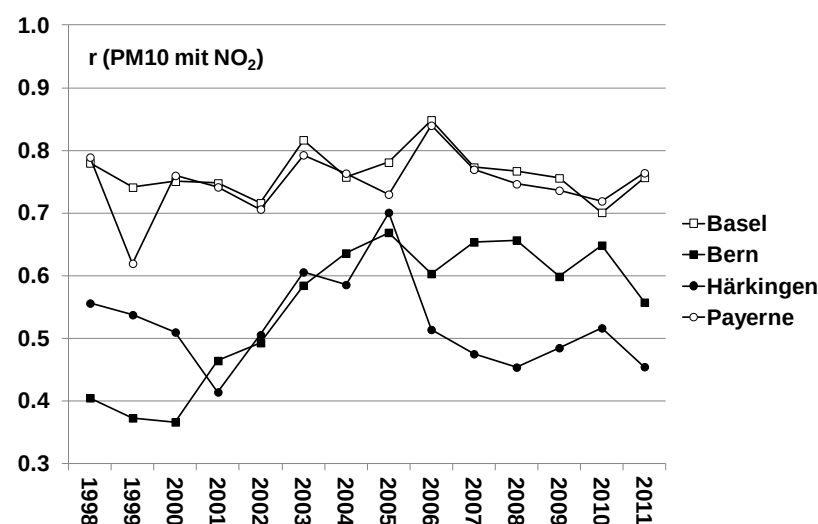
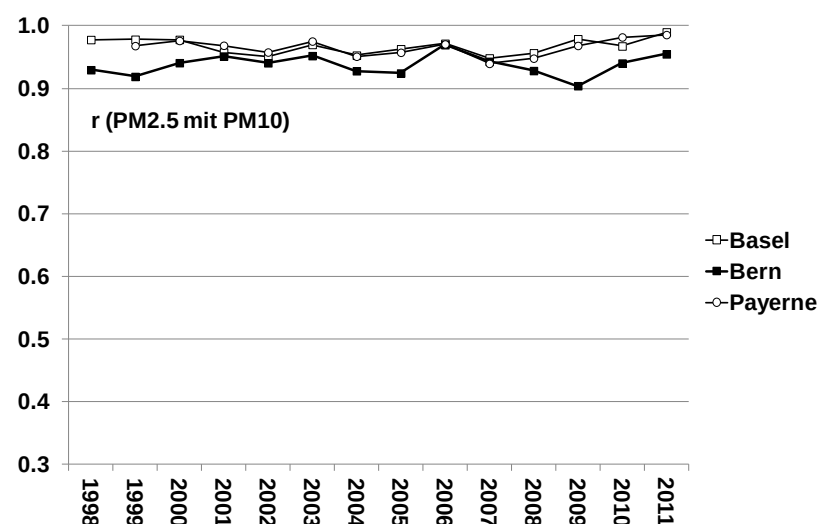


Daten: Paul Scherrer Institut (PSI)

Abb. 25 zeigt langjährige Verläufe ausgewählter Korrelationskoeffizienten von Tageswerten.

Abb. 25 > Langjährige Verläufe ausgewählter Korrelationskoeffizienten

auf der Basis von Tageswerten.

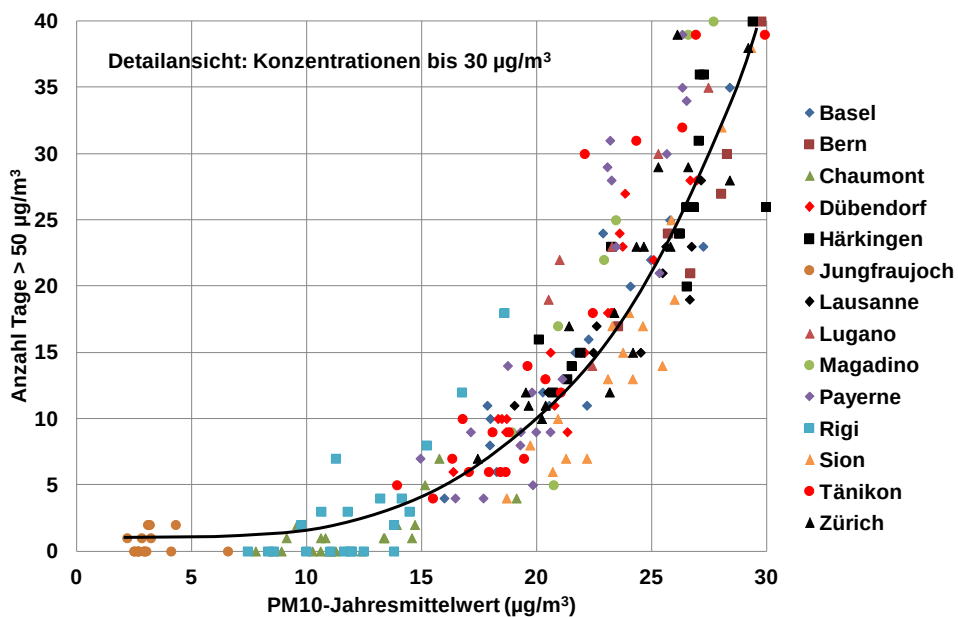
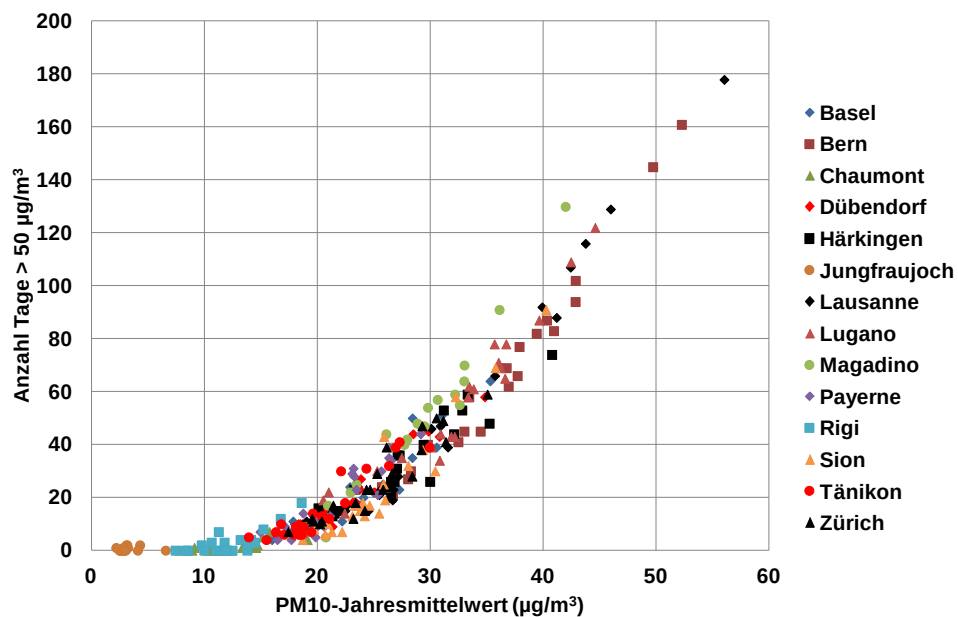


Daten: NABEL-Messnetz BAFU/Empa

Für PM₁₀ ist in der LRV sowohl ein Langzeitgrenzwert (Jahresmittel von maximal 20 µg/m³) als auch ein Kurzzeitgrenzwert (höchstens eine Überschreitung des Tagesmittels von 50 µg/m³) festgelegt. Abb. 26 zeigt, basierend auf sämtlichen Messwerten des NABEL, den Zusammenhang zwischen den gemessenen PM₁₀-Jahresmittelwerten und der korrespondierenden Anzahl der Überschreitungen des Kurzzeitgrenzwerts. Es ist ersichtlich, dass es offensichtlich viel schwieriger ist, den Kurzzeitgrenzwert einzuhalten als den Langzeitgrenzwert.

Abb. 26 > Zusammenhang zwischen den PM₁₀-Jahresmittelwerten und der Anzahl der Überschreitungen des Tagesgrenzwertes von 50 µg/m³

Oben: Ganzer Messbereich. Unten: Vergrösserte Ansicht des Bereichs bis 30 µg/m³



Daten: NABEL-Messnetz 1991–2012

A3-4 Synergien Luft Klima: EC/BC/OC/TC/Russ

Black Carbon hat neben den oben beschriebenen gesundheitlichen Effekten auch Auswirkungen auf unser Klima. Black Carbon absorbiert Sonnenlicht. Dadurch wird Licht in Wärme überführt, die durch die Partikel wieder an die Umgebung abgegeben wird. Dies bedeutet, dass die Atmosphäre durch Black Carbon erwärmt wird. Dieser Effekt, als Strahlungsantrieb (radiative forcing) bezeichnet, wurde im 5. IPCC Report (2013) mit $+0.6 \text{ W/m}^2$ angegeben (0.4 W/m^2 aus fossilen Quellen und 0.2 W/m^2 aus Biomasseverbrennung). Damit ist Black Carbon zusammen mit Methan die zweitwichtigste Strahlungsantriebs-Komponente nach dem Kohlendioxid, dessen Strahlungsantrieb auf $+1.68 \text{ W/m}^2$ beziffert wird. Black Carbon hat ausserdem einen zusätzlichen erwärmenden Effekt an der Oberfläche von Schnee und Eis, der auf 0.04 W/m^2 veranschlagt ist (IPCC, 2013). Dies bedeutet, dass sich eine Reduktion der Emissionen von Black Carbon nicht nur auf die Gesundheit, sondern auch auf das Klima günstig auswirkt. Die Klimaerwärmung könnte dadurch gebremst und vermindert werden. Bei Feinstaub-Komponenten, die das Licht hauptsächlich streuen anstatt absorbieren (Sulfat, Nitrat, OC – organic carbon, Mineralstaub), resultiert bei einer Reduktion der Emissionen hingegen eine Erwärmung. Da die meisten Quellen von Black Carbon gleichzeitig auch kleinere oder grössere Mengen anderer Feinstaub-Komponenten emittieren, würde eine Elimination aller Quellen von Black Carbon nicht zur vollen Reduktion des Strahlungsantriebs um 0.64 W/m^2 führen, sondern deutlich weniger. Allerdings wäre der Effekt im Gegensatz zu einer Reduktion der CO_2 -Emissionen schon nach kurzer Zeit messbar, weil Black Carbon eine Verweildauer in der Atmosphäre von nur etwa einer Woche hat, so dass sich – anders als beim CO_2 – sehr rasch eine niedrigere Konzentration einstellen würde.

Eine Reduktion von Black Carbon ist also nicht nur aus gesundheitlichen, sondern auch aus Klimaschutz-Gründen anzustreben. Sie würde sich beim Klima im Gegensatz zu Treibhausgas-Reduktionen schon nach sehr kurzer Zeit positiv auswirken.

Wie eingangs erwähnt emittieren insbesondere kleine Holzfeuerungen erhebliche Mengen an Black Carbon. Dies hat nicht nur gesundheitliche Auswirkungen, sondern verschlechtert auch die Klimabilanz der Verbrennung von Holz als erneuerbarer Energiequelle. Die Verwendung von Holz als erneuerbare Ressource ist sicher zu befürworten, allerdings ist darauf zu achten, dass diese Nutzung in erster Linie als Werkstoff erfolgt. Wenn Holz als Brennstoff eingesetzt wird, soll dies möglichst in grossen, professionell betriebenen Anlagen mit hohem Wirkungsgrad und effizienter Rauchgasreinigung erfolgen, damit möglichst geringe Feinstaub- und insbesondere Black-Carbon-Emissionen entstehen.

A4 Ansprüche an einen IGW für Luftschadstoffe

Ein zusätzlicher IGW muss auf einer Messgrösse basieren, welche einen klaren Bezug zu beobachteten Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt aufweist. Es muss ein anerkanntes Referenzmessverfahren bestehen und die Einhaltung bzw. Überschreitung des IGW sollte in den Messnetzen mit vertretbarem Aufwand überprüft werden können. Ein IGW per se führt noch nicht zu einer Verbesserung der Luftqualität. Diese wird erst durch die Einführung von emissionsmindernden Massnahmen erreicht. Das Vorgehen richtet sich nach Art. 31–34 der LRV. Im Fokus stehen die lufthygienischen Hauptproblembereiche, Holzverbrennung, motorische Emissionen und Landwirtschaft. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass in der Schweiz bereits umfangreiche Massnahmen getroffen wurden, welche zur Minderung der PM-, EC- und Partikelzahl-Emissionen des Verkehrs führen: Dank Euro-6 (PW, Lieferwagen und SNF), LSVA-Anreizen, LRV-Grenzwerten für Baustellenmaschinen, SAV-Bestimmungen für Schiffe, AB-EBV für Diesellokomotiven, Nachrüstpflicht für Busse konzessionierter Transportunternehmen und Vereinbarung bezüglich Ausrüstung neuer Pistenfahrzeuge mit Partikelfiltern, werden die Partikel- und EC-Emissionen in den kommenden Jahren stark zurückgehen.

PM2.5 weist einen klaren Bezug zu gesundheitlichen Auswirkungen auf und es besteht ein international anerkanntes Referenzmessverfahren. Die EKL hat zusätzlich zum nun vorgeschlagenen IGW für PM2.5 weitere Möglichkeiten evaluiert. Für die meisten alternativen möglichen Regelungsgrössen (Partikelzahl, OC, PAH, ROS, zusätzliche Metalle) ist der Bezug zwischen der Exposition der Bevölkerung und den gesundheitlichen Wirkungen noch nicht genügend klar belegt. Einige Indikatoren (u.a. EC/BC) scheiden aus, weil kein anerkanntes Referenzmessverfahren zur Verfügung steht. Der von der EKL vorgeschlagene IGW für PM2.5 wird zu einem Mehraufwand bei den Immissionsmessungen führen.

Die EKL hat als Alternative zu einem PM2.5-IGW auch eine Weiterführung des bisherigen Ansatzes geprüft, nach welchem die Verminderung der PM2.5-Konzentrationen nur indirekt über die Regulierung der PM10-Konzentrationen erfolgte. Wegen der nach wie vor bestehenden starken und an fast allen Standorten relativ stabilen Kopplung zwischen PM10 und PM2.5 könnte das Ziel des Gesundheitsschutzes auch durch Reduktion des PM10-IGW auf $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 erreicht werden. Damit würde die Schweizer LRV von den Empfehlungen der WHO deutlich abweichen. Die EKL lehnt einen internationalen Alleingang bei der PM10-Regulierung einstimmig ab.

Obwohl die Einführung eines IGW für die zusätzliche Messgrösse zu einem Mehraufwand bei der Immissionsüberwachung durch Bund und Kantone führt, hält ihn die EKL für vertretbar. Bereits heute werden die PM2.5-Belastungen an vielen NABEL-Stationen sowie im Rahmen wichtiger Gesundheitsforschungsprojekte regelmässig ermittelt, womit sich der durch die Ergänzung der LRV erforderte Mehraufwand für die Messung von PM2.5 in Grenzen hält. Aus den bestehenden Messungen ergibt sich eine gute Übersicht über die PM2.5-Belastung in der Schweiz. Da die räumliche Verteilung von PM2.5 relativ homogen ist, kann auf ein feinmaschiges Monitoring verzichtet werden. Bund und Kantone sollen kostengünstige Lösungen mit wenigen zusätzlichen Messstationen anstreben, wobei gewährleistet werden muss, dass die Immissionsgrenzwerte an allen Standorttypen eingehalten werden.

Falls der Zusatzaufwand von gewissen Kantonen trotzdem als zu hoch angesehen wird, kann eine alternative Lösung ins Auge gefasst werden: Der in den letzten Jahren beobachtete relativ konstante Zusammenhang zwischen PM2.5 und PM10 Jahresmittelwerten ermöglicht es, die PM2.5-Belastung aus den PM10-Messungen abzuschätzen, solange das Verhältnis zwischen PM2.5 und PM10 stabil bleibt.

A5 Chronologie der Schwebestaub-IGW und der EKL-Empfehlungen zu Schwebestaub, Feinstaub und Russ

Nach dem Inkrafttreten des USG am 1. Januar 1985 und der LRV am 1. März 1986 setzte der Bundesrat im Juli 1986 die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL als ständiges Beratungsgremium ein. Sie erhielt den Auftrag, das zuständige Departement bzw. Amt in wissenschaftlich-methodischen Fragen der Luftreinhaltung zu beraten. In der Folge fokussierte die EKL ihre Tätigkeit auf die Erarbeitung und Überprüfung der Grundlagen für die Festlegung der Immissionsgrenzwerte gemäss dem Stand der Wissenschaft und der Erfahrung im Sinne von Art. 13 und 14 USG.

Bereits 1985/86 war der Schwebestaub für die EKL ein wichtiges Thema. Im Bericht «Immissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe» (BUS 1986) hält die Kommission unter anderem fest: «Die gesundheitlichen Auswirkungen von Schwebestaub sind abhängig von der Grösse der Partikel sowie von deren Zusammensetzung. Massgebend sind vor allem die Anteile der atembaren Fraktionen». Auf der Basis der Empfehlungen der EKL hat der Bundesrat in der LRV 1986 für den «Schwebestaub insgesamt» folgende Immissionsgrenzwerte festgelegt: 70 µg/m³ als Jahresmittelwert und 150 µg/m³ als 95 %-Wert der 24h-Mittelwerte eines Jahres. Diese Werte entsprachen den damals auch in anderen Ländern, z. B. in Schweden oder Kanada gültigen Schwebestaub- resp. TSP-Grenzwerten. Die IGW der Schweiz waren in etwa auch im Einklang mit den TSP-Luftqualitätsrichtlinien (Guidelines) der WHO oder den Empfehlungen des VDI bezüglich TSP. In den USA und insbesondere in Kalifornien waren zu dieser Zeit bereits strengere PM10-Grenzwerte in Kraft gesetzt worden.

Rund 10 Jahre später hat sich die EKL erneut mit dem Thema «Schwebestaub» befasst und 1996 den Bericht «Schwebestaub – Messung und gesundheitliche Bewertung» veröffentlicht (BUWAL 1996). Aufgrund des damaligen Standes der Wissenschaft – und insbesondere auf der Basis der Resultate der grossen Schweizer Kohortenstudie SAPALDIA – hat die Kommission empfohlen, die IGW der LRV für «Schwebestaub insgesamt» aufzuheben und durch strengere Grenzwerte für «Schwebestaub PM10» zu ersetzen. 1998 hat der Bundesrat die Empfehlungen der EKL übernommen und in der LRV folgende Werte für PM10 in geltendes Recht umgesetzt: 20 µg/m³ als Jahresmittelwert und 50 µg/m³ als 24h-Mittelwert, welcher höchstens einmal pro Jahr überschritten werden darf. Diese IGW für PM10 sind heute noch gültig.

Im Jahr 2006 hat die Kommission das Thema Feinstaub erneut aufgegriffen und den Status-Bericht «Feinstaub in der Schweiz» (EKL 2007) veröffentlicht. Der Stand der Wissenschaft zu den gesundheitlichen Wirkungen der Feinstaubbelastung auf die menschliche Gesundheit war kurz zuvor durch die WHO umfassend aufgearbeitet und im Bericht «WHO Air Quality Guidelines – Global update» (WHO 2006) veröffentlicht worden. Aufgrund der Resultate von epidemiologischen Studien schlug die WHO – zusätzlich zu den PM10-Luftqualitätsrichtlinien – auch Richtlinien für PM2.5 vor (10 µg/m³ als Jahresmittelwert und 25 µg/m³ als 99 %-Wert der 24h-Mittelwerte eines Jahres). Die PM10-Richtwerte der WHO von 2005 entsprechen weitgehend den PM10-IGW, welche die Schweiz bereits 1998 festgelegt hatte. Da in der Schweiz PM10 und PM2.5 sehr hoch ($r > 0.9$ für Tagesmittelwerte) korreliert sind, war die EKL damals der Auffassung, dass PM10 nicht nur ein Indikator für die Fraktion der gröberen und feinen Partikel zusammen sondern auch ein guter Indikator für PM2.5 sei. Zudem gab es damals, ausser in den USA, weltweit – auch in der Schweiz – erst wenige epidemiologische Studien mit PM2.5 als Indikator. Aus diesen Gründen schlug die EKL im Jahr

2007 zusätzlich zum Grenzwert für PM₁₀ keinen Grenzwert für PM_{2.5} vor. Die Kommission hielt aber fest, im Hinblick auf einen möglichen PM_{2.5}-Immissionsgrenzwert sei die Situation weiterhin im Auge zu behalten und in spätestens 5 Jahren neu zu bewerten.

Zudem empfahl die EKL im Bericht von 2007, den Russpartikeln ein besonderes Augenmerk zu widmen. Russpartikel werden u.a. von Dieselmotoren ohne wirksame Abgasfilter ausgestossen oder entstehen bei der schlechten Verbrennung von Biomasse wie z. B. Holz. Russpartikel sind krebserregend. Für gewisse krebserregende Substanzen, wie z. B. Dieselmotoren, gilt in der LRV ein Minimierungsgebot für die Emissionen. Erste kontinuierliche Russmessungen im schweizerischen NABEL-Messnetz wurden im Jahr 2005 aufgenommen. Die Kommission hat damals empfohlen, die Russmessungen zu intensivieren, um eine bessere Abschätzung der Russbelastung der Bevölkerung zu ermöglichen und zur Erfolgskontrolle von bestimmten Massnahmen (z. B. Partikelfilter für Dieselmotoren).

A5-1 Feinstaub-Richtlinie der EU – Nationales Ziel für die Reduzierung der Exposition (Average Exposure Indicator AEI)

In der EU sind in der Richtlinie 2008/50/EG neben Grenz- und Zielwerten für PM_{2.5} auch Ziele für eine Reduktion der mittleren PM_{2.5}-Belastung der Bevölkerung festgehalten. Es sind prozentuale Reduktionsziele, welche von der Höhe der momentanen Belastung abhängig sind, nicht aber von der Höhe der aktuellen PM_{2.5}-Grenz- und Zielwerte. Zurzeit sind diese Reduktionsziele in der EU rechtlich nicht bindend, aber die REVIHAAP-Expertengruppe hat vorgeschlagen, dass rechtlich bindende AEI eine sinnvolle Ergänzung zu den PM-Grenz- und Zielwerten sein könnten. Bei linearen Konzentrations-Wirkungsbeziehungen ohne erkennbaren Schwellenwert hat jede Reduktion der mittleren Belastung der Bevölkerung einen gesundheitlichen Nutzen, unabhängig von der momentanen Belastung oder einem Grenzwert. Die EKL hat geprüft, ob die Festlegung eines rechtlich bindenden prozentualen Expositionsreduktionsziels als Beurteilungsmassstab die Anordnung von Massnahmen zur Reduktion der Belastung der Bevölkerung in der Schweiz zusätzlich unterstützen könnte. Obwohl sie das Konzept als durchaus sinnvoll erachtet, hat die Kommission aber davon abgesehen, für die Schweiz ein rechtlich bindendes Reduktionsziel für PM_{2.5} oder PM₁₀ vorzuschlagen. Hingegen empfiehlt sie im vorliegenden Bericht, ein Reduktionsziel für Russ zu setzen.

EKL

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene arbeitet als selbstständige und interdisziplinäre Verwaltungskommission des Bundes auf dem Gebiet der Luftreinhaltung unter Einbezug von Wissenschaft, Forschung, Vollzug und Verwaltung. Die Kommission berät das Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in wissenschaftlich-methodischen Fragen der Luftreinhaltung und der Wirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit und das Wohlbefinden von Menschen, Tiere, Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume. Sie erarbeitet die entsprechenden Unterlagen, Berichte, Empfehlungen und Anträge.

A6 Abkürzungsverzeichnis

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (SR 742.141.11)
AEI	Average Exposure Indicator – mittlere (Schadstoff-)Exposition der Bevölkerung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BaP	Benzo(a)pyren (ein polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff, PAK)
BC	Black Carbon, ein Mass für Russ
BFE	Bundesamt für Energie
BS	black smoke – schwarzer Rauch (ein Mass für Russ)
BUS	Bundesamt für Umweltschutz (heute: BAFU)
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (heute: BAFU)
BV	Bundesverfassung (SR 101)
CEN	Comité Européen de Normalisation – Europäisches Komitee für Normung
CEN/TR	technical report – technischer Bericht des CEN
Cl	Elementsymbol für Chlor
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DI	Direkteinspritzung (Treibstoffeinspritztechnik bei Motoren)
DPF	Dieselpartikelfilter
EC	elemental carbon – elementarer Kohlenstoff, ein Mass für Russ
EF	Emissionsfaktor
EG	Europäische Gemeinschaft
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
ESCAPE	European Study of Cohorts for Air Pollution Effects; ein Projekt der EU
EU	Europäische Union

EUSAAR2	im EU-Projekt EUSAAR (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research) entwickeltes Temperaturprotokoll zur thermo-optischen Messung des Kohlenstoffgehalts von Partikeln (EC und OC)
HEL	Heizöl Extra leicht
HNO ₃	Salpetersäure
IARC	International Agency for Research on Cancer (Internationale Agentur für Krebsforschung der WHO)
IGW	Immissionsgrenzwert
K	Elementsymbol für Kalium
LRV	Luftreinhalte-Verordnung (SR 814.318.142.1)
LSVA	leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
Na	Elementsymbol für Natrium
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
NFZ	Nutzfahrzeuge
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
NH ₄ NO ₃	Ammoniumnitrat
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammoniumsulfat
NMVOC	flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen ohne Methan
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickoxide (NO + NO ₂)
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO ₃ ⁻	Nitrat
OC	organic carbon – organischer (partikulärer) Kohlenstoff, Bestandteil von Partikeln und Russ
OM	organisches (partikuläres) Material (organischer Kohlenstoff inklusive Fremdatome der organischen Verbindungen; meist über einen konstanten Faktor aus OC abgeschätzt)
PAH/PAK	polycyclic aromatic hydrocarbons / polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PFI	Port fuel injection – konventionelle Saugrohreinspritztechnik (Treibstoffeinspritztechnik bei Benzinmotoren)

PM	Particulate matter; teilchenförmiges Material in der Luft
PM1	Masse aller Feinstaubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 1 µm oder kleiner in der Luft (meist in µg/m ³ angegeben)
PM10	Masse aller Feinstaubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm oder kleiner in der Luft (meist in µg/m ³ angegeben)
PM2.5	Masse aller Feinstaubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2.5 µm oder kleiner in der Luft (meist in µg/m ³ angegeben)
POM	partikuläres organisches Material (= OM)
PW	Personenwagen
r	Korrelationskoeffizient
REVIHAAP	Review of evidence on health aspects of air pollution to review EU policies – WHO-Bericht zuhanden der Europäischen Kommission
ROS	Reactive Oxygen Species – Mass für das Oxidationspotenzial von Partikeln
S	Elementsymbol für Schwefel
SAPALDIA	Swiss study on Air Pollution And Lung Disease In Adults – Schweizer Kohortenstudie über Luftverschmutzung und Atemwegserkrankungen bei Erwachsenen
SAV	Verordnung über die Abgasemissionen von Schiffsmotoren auf schweizerischen Gewässern (SR 747.201.3)
SCARPOL	Swiss Study on Childhood Allergy and Respiratory Symptoms with Respect to Air Pollution – Schweizer Studie über Atemwegsbeschwerden und Allergien bei Schulkindern
SCR	selective catalytic reduction – selektive katalytische Reduktion; Technik zur Reduktion von Stickoxiden in Abgasen
SMPS	scanning mobility particle sizer; Gerät zur Messung von Partikelgrössenverteilungen
SNF	schwere Nutzfahrzeuge (Lastwagen, Busse etc.)
SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₃	Schwefeltrioxid
TC	total carbon – totaler (partikulärer) Kohlenstoff, Summe von EC und OC
TSP	Total suspended particulate matter – Schwebestaub mit einer Sinkgeschwindigkeit ≤10 cm/s; Masse der Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser <57 µm
UFP	ultrafine particles – ultrafeine Stäube mit einer Grösse von ≤100 nm
USA	Vereinigte Staaten von Amerika

USG	Umweltschutzgesetz (SR 814.01)
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VDI	Verband deutscher Ingenieure
WHO	World Health Organization – Weltgesundheitsorganisation
Zn	Elementsymbol für Zink

Masseinheiten

dN/dlogDp	Anzahl Partikel in einem logarithmischen Grössenintervall (des Partikeldurchmessers)
kWh	Kilowattstunde
nm	Nanometer (Milliardstel Meter)
Part/cm ³ , #/cm ³	Anzahl Partikel pro Kubikzentimeter Luft
µg/m ³	Mikrogramm pro Kubikmeter (Millionstel Gramm pro Kubikmeter)
µm	Mikrometer (Millionstel Meter)
t/a	Tonnen pro Jahr
TJ	Terajoule = 10 ¹² Joule

A7 Dokumentation

ASTRA 2003: Verifikation von PM10-Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs.
Forschungsauftrag ASTRA 2000/415, Bundesamt für Strassen, Bern.

ASTRA 2009: PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs/PM10
emission factors of abrasion particles from road traffic, Forschungsauftrag ASTRA
2005/007, Bundesamt für Strassen, Bern (Englischer Bericht mit deutscher
Zusammenfassung) www.bafu.admin.ch/luft/11017/11019/index.html?lang=de.

BAFU 2005: Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen, Stand September 2005,
Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU 2008, Schöffeler U., Keller M., Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des
Offroad-Sektors. Umwelt-Wissen Nr. 0828. Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU 2010: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1990–2035. Umwelt-Wissen
Nr. 1021. Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU 2013: PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland. Environmental
Studies 1304. Bundesamt für Umwelt, Bern
[www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01700/index.html?lang=en&show_kat=/publi
kationen](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01700/index.html?lang=en&show_kat=/publikationen).

Bayer-Oglesby L., Grize L., Gassner M., Takken-Sahli K., Sennhauser F.H., Neu U.,
Schindler C., Braun-Fahrlander C. 2005: Decline of ambient air pollution levels and
improved respiratory health in Swiss children. Environmental health perspectives: 113
(11), 1632–1637.

Beelen R., Raaschou-Nielsen O., Stafoggia M., Jovanovic Andersen Z., Weinmayr G.,
Barbara Hoffmann B., Wolf K., Samoli E., Fischer P., Nieuwenhuijsen M., Vineis P., Xun
W., Katsouyanni K., Dimakopoulou K., Oudin A., Forsberg B., Modig L., Havulinna A.,
Lanki T., Turunen A., Oftedal B., Nystad W., Nafstad P., De Faire U., Pedersen N.L.,
Östenson C.-G., Fratiglioni L., Penell J., Korek M., Pershagen G., Thorup Eriksen K.,
Overvad K., Ellermann T., Eeftens M., Peeters P.H., Meliefste K., Wang M., Bueno-de-
Mesquita B., Sugiri D., Krämer U., Heinrich J., de Hoogh K., Key T., Peters A., Hampel R.,
Concin H., Nagel G., Ineichen A., Schaffner E., Probst-Hensch N., Künzli N., Schindler C.,
Schikowski T., Adam M., Phuleria H., Vilier A., Clavel-Chapelon F., Declercq C., Grioni S.,
Krogh V., Tsai M.-Y., Ricceri F., Sacerdote C., Galassi C., Migliore E., Ranzi A., Cesaroni
G., Badaloni C., Forastiere F., Tamayo I., Amiano P., Dorronsoro M., Katsoulis M.,
Trichopoulos A., Brunekreef B., Hoek G. 2013: Effects of long-term exposure to air
pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the
multicentre ESCAPE project. The Lancet, Early Online Publication, 9 December 2013;
doi:10.1016/S0140-6736(13)62158-3.

BFE 2011: Schweizerische Holzenergiestatistik, Erhebung für das Jahr 2010, Bundesamt
für Energie, Bern.

Brook R.D., Rajagopalan S., Pope C.A., 3rd, Brook J.R., Bhatnagar A., Diez-Roux A.V.,
Holguin F., Hong Y., Luepker R.V., Mittleman M.A., Peters A., Siscovick D., Smith S.C.,
Jr., Whitsett L., Kaufman J.D., American Heart Association Council on E., Prevention
C.o.t.K.i.C.D., Council on Nutrition P.A., Metabolism. 2010: Particulate matter air pollution
and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American
Heart Association. Circulation: 121 (21), 2331–2378.

Buonanno G., Lall A.A. and Stabile L. 2009: Temporal size distribution and concentration
of particles near a major highway. Atmos. Environ. 43(5): 1100–1105.

BUS 1986: Immissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe. Bern.

BUWAL 1996: Schwebestaub – Messung und gesundheitliche Bewertung. Bericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene, Bern.

Eeftens M. et al. 2012: Spatial variation of PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5} absorbance and PM_{coarse} concentrations between and within 20 European study areas and the relationship with NO₂ – Results of the ESCAPE project. Atmos. Environ. 62: 303–317.

EKL 2007: Feinstaub in der Schweiz. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene, Status-Bericht, Bern.

EKL 2010: 25 Jahre Luftreinhaltung auf der Basis des Umweltschutzgesetzes. Bern

Gauderman W.J., Avol E., Gilliland F., Vora H., Thomas D., Berhane K., McConnell R., Kuenzli N., Lurmann F., Rappaport E., Margolis H., Bates D., Peters J. 2004: The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. N Engl J Med 351 (11): 1057–1067.

Gehrig R. 2013 a: Zusätzliche Partikelmessungen im NABEL. Bericht über die Messungen 2012. Empa Nr. 203 056/20, Empa, Dübendorf www.empa.ch/plugin/template/empa/*122282.

Gehrig R. 2013 b: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM₁₀ an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone. Messbericht 2012. Empa Nr. 203 056/21, Empa, Dübendorf www.empa.ch/plugin/template/empa/*139652.

Gehring U., Wijga A.H., Brauer M., Fischer P., de Jongste J.C., Kerkhof M., Oldenwening M., Smit H.A., Brunekreef B. 2010: Traffic-related air pollution and the development of asthma and allergies during the first 8 years of life. Am J Respir Crit Care Med 181 (6): 596–603.

Geiser M. B.M. Rothen-Rutishauser N. Kapp S. Schürch W. Kreyling H. Schulz M. Semmler V. Im Hof J. Heyder, Gehr P. 2005. Ultrafine particles cross cellular membranes by non-phagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. Environ. Health Perspect. 113: 1555–1560,.

Herich H., Hüglin C. 2011: Monitoring der Russimmissionen im Rahmen des NABEL. EMPA Abteilung Luftfremdstoffe / Umwelttechnik Zwischenbericht 2010.

Hoek G., Krishnan R.M., Beelen R., Peters A., Ostro B., Brunekreef B., Kaufman J. 2013: Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. Environ Health 12:43.

Hüglin C., Gianini M., Gehrig R. 2012: Chemische Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub. EMPA, Dübendorf www.bafu.admin.ch/luft/00575/00578/index.html?lang=de.

IARC 2012: Diesel engine exhaust carcinogenic. Cent Eur J Public Health. 20 (2):120, 138.

Infras 2007, Heldstab J., Kljun N.: PM₁₀-Emissionen Verkehr, Teil Schienenverkehr, Bern www.bafu.admin.ch/luft/11017/11046/11268/index.html?lang=de.

IPCC 2013, WORKING GROUP I CONTRIBUTION TO THE IPCC FIFTH ASSESSMENT REPORT (AR5), CLIMATE CHANGE 2013: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/.

Janssen N.A.H., Hoek G., Simic-Lawson M., Fischer P., van Bree L., ten Brink H., Keuken M., Atkinson R.W., Anderson H.R., Brunekreef B., Cassee F.R. 2011: Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared to PM10 and PM2.5. *Environ Health Perspect* 119 (12): 1691–1699.

Kelz J., Brunner T., Obernberger I. 2012: Emission factors and chemical characterisation of fine particulate emissions from modern and old residential biomass heating systems determined for typical load cycles. *Environmental Sciences Europe*, 24:11 www.enveurope.com/content/24/1/11.

Klippel N., Nussbaumer T. 2007: Einfluss der Betriebsweise auf die Partikelemissionen von Holzöfen. Bundesamt für Energie, Bern.

Kreyling WG, Semmler M, Erbe F, Mayer P, Takenaka S, Schulz H, Oberdörster G, Ziesenis A. 2002: Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. *J Toxicol Environ Health A* 65: 1513–1530.

Lanki T., Pekkanen J., Aalto P., Elosua R., Berglind N., D'Ippoliti D., Kulmala M., Nyberg F., Peters A., Picciotto S., Salomaa V., Sunyer J., Tiittanen P., von Klot S., Forastiere F. 2006: Associations of traffic-related air pollutants with hospitalisation for first acute myocardial infarction. The HEAPSS study. *Occup Environ Med* 63: 844–851.

Mills N.L., Miller M.R., Lucking A.J., Beveridge J., Flint L., Boere A.J., Fokkens P.H., Boon N.A., Sandstrom T., Blomberg A., Duffin R., Donaldson K., Hadoke P.W., Cassee F.R., Newby D.E. 2011: Combustion-derived nanoparticulate induces the adverse vascular effects of diesel exhaust inhalation. *Eur Heart J* 32 (21): 2660–2671.

Naess O., Nafstad P., Aamodt G., Claussen B., Rosland P. 2007: Relation between concentration of air pollution and cause-specific mortality: four-year exposures to nitrogen dioxide and particulate matter pollutants in 470 neighborhoods in Oslo, Norway. *American journal of epidemiology*: 165 (4), 435–443.

Nussbaumer T. 2008: Feinstaub-Emissionsfaktoren von Holzheizungen: Übersicht aus Ländern der Internationalen Energie Agentur. Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Tagungsband zum 10. Holzenergie-Symposium, 12. September 2008 an der ETH Zürich, Verenum Zürich 2008 ISBN 3-908705-19-3.

Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, Cox C. 2004: Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 16: 437–445.

Oftedal B., Brunekreef B., Nystad W., Madsen C., Walker S.E., Nafstad P. 2008: Residential outdoor air pollution and lung function in schoolchildren. *Epidemiology*: 19 (1), 129–137.

Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.M., Baltensperger U., Holzer-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X.Y. 2013: Recommendations for the interpretation of «black carbon» measurements. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 13, 9485–9517.

Pope C.A., 3rd. 2007: Mortality effects of longer term exposures to fine particulate air pollution: review of recent epidemiological evidence. *Inhalation toxicology*: 19 Suppl 1 33–38.

Quincey P., Butterfield D., Green D. and Fuller G.W. 2011: Black Smoke and Black Carbon: Further investigation of the relationship between these ambient air metrics. *Atmos. Environ.* 45(21): 3528-3534.

Raaschou-Nielsen O., Andersen Z.J., Beelen R. et al. 2013: Air pollution and lung cancer incidence; prospective analyses in 17 European cohorts within the ESCAPE study. *Lancet Oncology*; doi: 10.1016/S1470-2045(13)70279-1.

Rothen-Rutishauser B., Muhlfeld C., Blank F., Musso C., Gehr P. 2007: Translocation of particles and inflammatory responses after exposure to fine particles and nanoparticles in an epithelial airway model. *Part Fibre Toxicol* 4: 9.

Schindler C., Keidel D., Gerbase M.W., Zemp E., Bettschart R., Brandli O., Brutsche M.H., Burdet L., Karrer W., Knopfli B., Pons M., Rapp R., Bayer-Oglesby L., Kunzli N., Schwartz J., Liu L.J., Ackermann-Liebrich U., Rochat T., Team S. 2009: Improvements in PM10 exposure and reduced rates of respiratory symptoms in a cohort of Swiss adults (SAPALDIA). *Am J Respir Crit Care Med*: 179 (7), 579–587.

Schreiber D., A.-M. Forss M. Mohr and P. Dimopoulos 2007: Particle Characterisation of Modern CNG, Gasoline and Diesel Passenger Cars. SAE Paper 2007-24-0123.

Semmler M., Seitz J., Erbe F., Mayer P., Heyder, J., Oberdörster G., Kreyling W.G. 2004: Long-term clearance kinetics for inhaled ultrafine insoluble Iridium particles from the rat lung, including transient translocation into secondary organs. *Inhal. Toxicol.*, 16 (6–7), 453–459.

Tsoi C.T., Tse L.A. 2012: Professional drivers and lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Occup Environ Med* 69 (11): 831–836.

WHO 2006: WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide – Global Update 2005. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

WHO 2012: Health Effects of Black Carbon. N Janssen et al. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

WHO 2013: Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution – REVIHAAP Project. Final Technical Report. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report.